



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID

ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIEROS INDUSTRIALES



DISEÑO MECÁNICO DE UN MOLINO MANCHEGO ADAPTADO A GENERACIÓN ELÉCTRICA

TRABAJO FIN DE GRADO

Nicolás Muñoz Castellano

Tutores del Trabajo de Fin de Grado

José Luis Muñoz Sanz

Alejandro Abou-Assali

RESUMEN

Las energías renovables como fuente de autoconsumo es un campo en auge. La finca en la que se encuentra el elemento analizado en este proyecto es un perfecto ejemplo de esto incluyendo tecnologías de aprovechamiento solar fotovoltaico, geotérmico y eólico. Esta última tecnología es de la que parte este trabajo. Se trata de una instalación que emula un molino manchego clásico cuyo movimiento rotatorio se utiliza para generar electricidad. La frecuente aparición de problemas es la razón por la cual ha motivado que se recurriese a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales (ETSII) de la Universidad Politécnica de Madrid (UPM) en busca de soluciones.



En este proyecto se tratan los problemas mecánicos encontrados en el molino mediante el cálculo y análisis de la estructura ante las diferentes acciones que sufre para poder ofrecer soluciones con el fin último de conseguir poner en funcionamiento la instalación.

Para lograr el objetivo final dentro de la ETSII se dividió el proyecto en tres partes diferenciadas según el campo de acción para tratar los problemas específicamente y realizar un análisis más exhaustivo. Una parte se ha encargado de la aerodinámica y la extracción de energía del viento en el Departamento de Ingeniería Energética y Fluidomecánica (DIEF), el Departamento de Máquinas Eléctricas se ha encargado del estudio del alternador existente para la transformación de potencia y en el Departamento de Ingeniería de Máquinas (DIM) se ha realizado el análisis de la estructura, fuente principal de fallos, y otros problemas mecánicos. Este documento se ocupa de este último campo, centrándose principalmente en el cálculo estructural.

El principal fallo sufrido por el molino es la rotura de los apoyos utilizados para soportar la cubierta. Se han utilizado distintos tipos de rodamientos ya que toda la parte superior del molino debe ser capaz de girar para orientar las aspas de frente al viento. Todas las

soluciones anteriores han terminado por fallar desequilibrando la cubierta e imposibilitando su orientación lo que impide por completo su control.

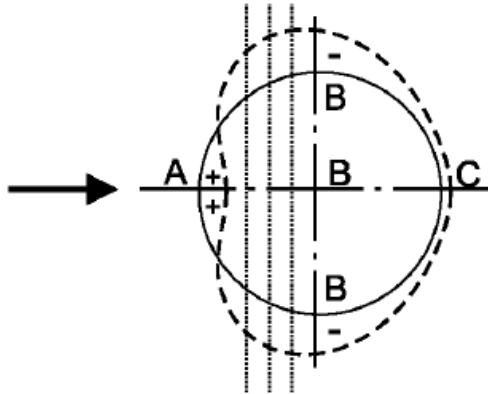
Existen además otros problemas que aunque no bloquean el funcionamiento sí lo dificultan. Estos son las imperfecciones en el montaje, la mala ubicación de la multiplicadora y el uso de topes inadecuados.

A pesar de que para estas irregularidades se han propuesto soluciones este proyecto se centra especialmente en el que impide que la instalación opere, la rotura de los apoyos. Para poder aportar una solución se procede a realizar el cálculo de la estructura y determinar la carga correspondiente en los apoyos. Para ello se impone que únicamente se utilizarán tres apoyos y asegurar así el contacto permanente. Se estima que los fallos anteriores se debían a haber utilizado un número mayor de rodamientos y haber pensado que la carga se repartiría por igual entre ellos.

A la hora de abordar este problema se decide que se debe operar con una estructura simplificada, es necesario transformar los elementos tridimensionales en otros de carácter lineal. Para ello se utiliza un programa del DIM ya utilizado para otros proyectos en el departamento. Esta herramienta se basa en el cálculo matricial para realizar los cálculos estructurales, lo que requiere un conocimiento de las matrices de rigidez y de los procedimientos requeridos para utilizar este método.

Uno de los primeros pasos del estudio consiste en determinar qué cargas deben estar presentes para aproximarse lo máximo posible a la situación real y que tengan una influencia significativa en el resultado. La resolución final incluye la acción de la gravedad traduciéndose en el peso del eje transmitido a través de los puntos de apoyo en la estructura, el peso de la propia estructura y el del cerramiento de la cubierta, por último se incluye como única acción dinámica la del viento.

Las cargas estáticas que aplican necesitan de cálculos previos pero no tienen mayor dificultad técnica, sin embargo para delimitar la acción creada por el viento sobre una estructura se acude al EUROCÓDIGO 1. No existe ningún caso que aparece en dicha norma que se aplique a la estructura aquí analizada, sin embargo se puede realizar una combinación de casos existentes, una cúpula y una cubierta a cuatro aguas, atendiendo a los parecidos entre estructuras para llegar a una solución de la distribución de coeficientes lo más acorde posible a la forma de la cubierta estudiada. Debido a su planta circular se ha utilizado la evolución del coeficiente de presión de la cúpula en el plano base, la base del cono, pero dado que las vigas son rectas las presiones no deberían variar casi a lo largo de su longitud, que es lo que sucede con los valores de la cubierta a cuatro aguas con vigas rectas y mismo ángulo. Por tanto la presión se mantiene constante a lo largo de la viga pero es distinta para cada una de ellas.

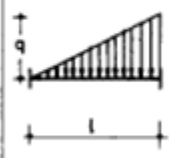



Una vez se conocen las cargas se deben introducir todos los datos en el programa de la forma adecuada para poder realizar simulaciones en diferentes situaciones. Una característica esencial a tener en cuenta del cálculo matricial es que no puede operar con cargas en las vigas, únicamente en los nudos. La solución a esto consiste en descomponer el problema en dos, uno con la barra aislada y cargas en la viga del que se obtienen las reacciones en los apoyos, y otro en el que estas reacciones previamente halladas se colocan en los nudos. Este último es en el que se utiliza el cálculo matricial y del que se obtienen los resultados utilizados. Para la distribución correcta de los esfuerzos en las barras habría que incluir los que aparecían en el problema de la barra aislada pero dado que en el caso estudiado los esfuerzos en las barras no generan problemas por lo que no suponen un dato relevante a calcular.

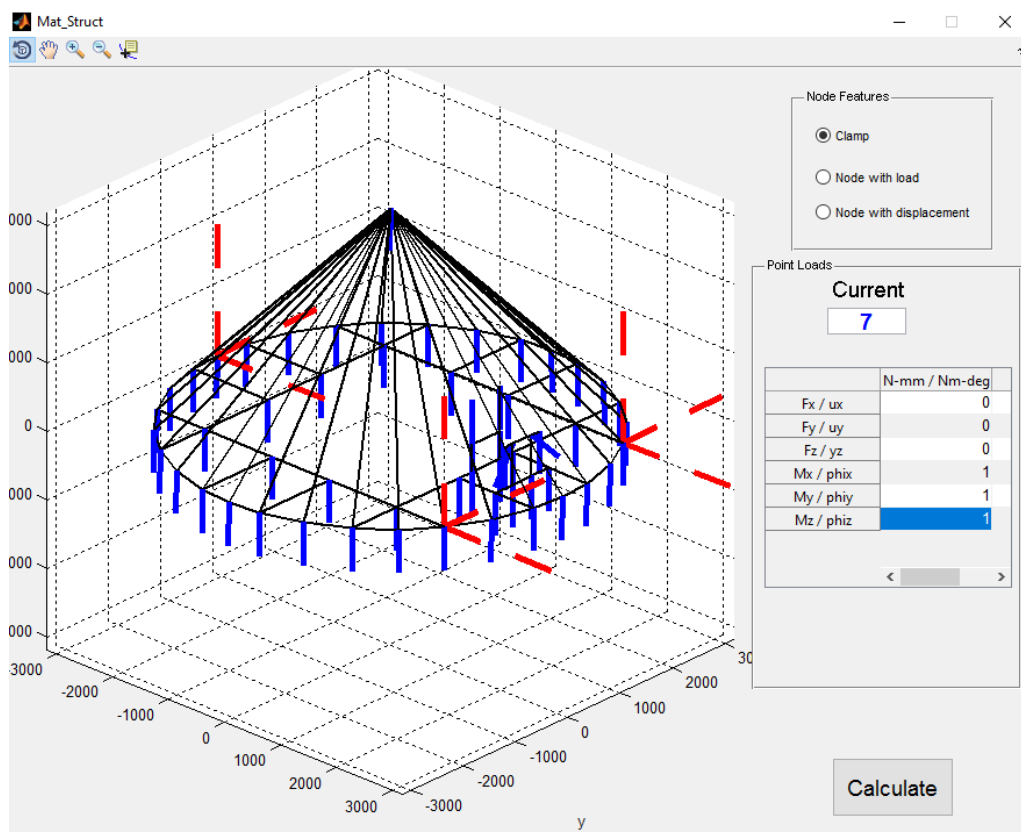
Para todos los casos en los que ha sido necesario descomponer el problema se ha recurrido al formulario de vigas simples aportado por la ETSII para la asignatura del Máster Universitario en Ingeniería Industrial

VIGA EMPOTRADA DISTINTAS HIPOTESIS DE CARGA

F, q y segmentos, en valor absoluto.

SOLICITACION	MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO PERFECTO	REACCIONES EN LOS APOYOS	DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES
	$\mu_A = \frac{ql^2}{30}$ $\mu_B = -\frac{ql^2}{20}$	$R_A = \frac{3}{20}ql$ $R_B = \frac{7}{20}ql$	

Cuando se tienen todos los datos en la forma correcta se introducen en los nudos correspondientes, habiendo definido previamente la estructura en Matlab. Una vez introducidas las cargas se eligen los apoyos y se calcula.



Se han probado diferentes distribuciones de los puntos de apoyo hasta encontrar la idónea. Del mismo modo para cada una se han simulado tres escenarios distintos para probar todas las posibles situaciones de carga o trabajo. Se ha realizado un cálculo sin acción dinámica, otro con viento frontal en situación de trabajo y otro con viento por encima de la velocidad límite incidente lateralmente para no dañar el molino.

	SIN CARGA DINÁMICA (kN)	ACCIÓN FRONTAL DEL VIENTO (kN)	ACCIÓN LATERAL DEL VIENTO (kN)
Frontal₁	10,67	8,97	9,06
Frontal₂	10,67	8,97	9,24
Trasero	12,48	11,99	11,46

Se han incluido en las cargas el peso correspondiente a la multiplicadora propuesta por el estudio de la parte eléctrica y la aerodinámica atendiendo a los diferentes pares y velocidades presentes a cada lado.

Una vez conocidas las cargas se han buscado y propuesto soluciones para los diferentes problemas.

-
- Para los apoyos: El modelo de roldana NUTR 45100 que soporta 80 kN del proveedor SKF
 - Para los topes laterales: Rueda de poliamida de capaz de soportar 1500 kg del proveedor Gayner.
 - Para soporte de la multiplicadora se ha diseñado una chapa que aprovecha la disposición de los elementos de la estructura. Está ubicada en la parte frontal evitando desequilibrios y aprovechando el espacio existente.

A parte de esto se han actualizado los planos que no habían sido modificados tras diferentes cambios en la estructura.

Con todo esto y atendiendo también al trabajo realizado en los otros dos departamentos se espera lograr el correcto funcionamiento del molino para generar electricidad y servir de herramienta lectiva para los jóvenes que acudan al albergue en el que se encuentra.

Palabras clave

Estructura, apoyos, cargas, acción del viento.

Código UNESCO

3305.32 Ingeniería de Estructuras
3305.21 Construcciones Metálicas
3306.02 Aplicaciones Eléctricas
3306.07 Maquinaria Rotatoria
3310.04 Ingeniería de Mantenimiento
3313.23 Equipo Mecánico de Transmisión de Potencia
3322.02 Generación de Energía

ÍNDICE

1. INTRODUCCIÓN	12
1.1 Marco de desarrollo del proyecto.....	13
1.1.1 El molino	13
1.2. Recurso eólico	14
1.2.1. Velocidad del viento	15
1.3. Estado del arte.....	22
1.3.1. Clasificación de las instalaciones eólicas.....	22
1.3.2. Transformaciones de molinos clásicos	25
2. OBJETIVOS.....	32
3. REQUISITOS.....	33
4. ESTUDIO DEL CONJUNTO	34
4.1. Funcionamiento.....	34
4.1.1. Captación eólica	34
4.1.2. Transmisión de la potencia.....	37
4.1.3. Sistema de orientación.....	38
4.1.4. Alternador	40
4.1.5. Resistencia	43
4.2. Problemas	43
4.2.1. Material de las aspas	43
4.2.2. Ausencia de multiplicadora	43
4.2.3. Ubicación de multiplicadora y alternador	44
4.2.4. Raíl en U	44
4.2.5. Apoyos entre la cúpula móvil y la estructura fija del molino.....	46
4.2.6. Eje irregular	48
5. Cálculo de la estructura.....	49
5.1. Fundamento teórico: Cálculo matricial.....	50
5.2. Cálculos Previos	54
5.2.1. Acción del viento	55
5.2.2. Cálculo de la reacción en los apoyos del eje.....	61

5.3. Metodología.....	63
5.3.1. Localización de los nodos de la Estructura.....	64
5.3.2. Creación de las vigas.....	67
5.3.3. Determinación de las propiedades de las vigas.....	69
5.3.4. Clasificación de los nodos y cargas sobre los mismos.....	72
5.3.5. Exposición de los resultados	79
5.3.6. Confirmación o cambio de características de los nodos.....	80
5.3.7. Exposición de resultados.....	80
5.4. Escenarios posibles.....	82
6. RESULTADOS.....	84
6.1. Un apoyo frontal y dos traseros	85
6.2. Un trasero y dos frontales separados.....	86
6.3. Un trasero y dos frontales juntos.....	88
7. SOLUCIONES PROPUESTAS.....	90
7.1. Apoyos de la cúpula	90
7.2. Multiplicadora	93
7.3 Topes laterales.....	97
DESARROLLO DEL PROYECTO.....	99
FASES DEL TRABAJO.....	99
Recolección de datos.....	99
Realización de planos.....	100
Documentación.....	100
Cálculos y simulaciones	100
Resultados y Soluciones.....	101
Elaboración del documento.....	101
Distribución temporal.....	101
ESTUDIO ECONÓMICO	102
CONCLUSIONES.....	106
ÍNDICE DE FIGURAS	108
ÍNDICE DE TABLAS	110
BIBLIOGRAFÍA.....	111
ANEXO I. PLANOS	113
Estructura del plano base	114

Cubierta.....	116
Eje transmisor.....	118
Eje complementario.....	120
Base del eje.....	122
Soporte inclinado 1.....	124
Soporte inclinado 2.....	125
Soporte multiplicadora.....	126
ANEXO II. HOJA DE CÁLCULO PARA LA ACCIÓN DEL VIENTO.....	127
ANEXO III. PROGRAMA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MÁQUINAS	128
Mat_Struct_Main_tfg.....	128
Molino_La_Inesa	130
EstructBeams	140
ANEXO IV. PRESUPUESTO GLOBAL DEL MOLINO.....	150

1. INTRODUCCIÓN

El presente trabajo surge como respuesta a la solicitud de ayuda del ingeniero Julio Pacheco a la Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales de Madrid para un proyecto para la Fundación Carral.

El proyecto consiste en un aerogenerador con un diseño clásico que imita el del molino manchego. Su finalidad es la de encajar visualmente con el emplazamiento rural del mismo y aumentar el valor educativo del albergue en el campo de las energías renovables al mismo tiempo que funciona como fuente de energía.

Este trabajo trata de analizar los problemas mecánicos y estructurales por los que no se logra el correcto funcionamiento del molino y propone una serie de soluciones para salvarlos.

Siguiendo el aumento de demanda de energías renovables en respuesta a la preocupación social por el cambio climático la energía eólica ha experimentado un fuerte crecimiento. Como toda industria posee ventajas e inconvenientes, estos últimos deben minimizarse con el paso del tiempo.

Las críticas más comunes al campo de la energía eólica son su baja densidad de energía y el negativo impacto visual. Su falta de constancia es algo común con otras energías renovables, ya que no se pueden controlar aquellos recursos naturales de los que dependen, por lo que es algo intrínseco a la naturaleza de estas energías y no es específico de la eólica.

La densidad de energía es la cantidad de energía eléctrica generada por unidad de volumen o superficie ocupadas por la planta generadora. Es cierto que la energía del viento necesita de una extensión mucho mayor para producir cantidades de energía menores a las producidas por centrales térmicas, sin embargo se está aumentando la competitividad gracias a la mejora de dos factores principalmente: la tecnología y el diseño. La tecnología ha permitido el uso de materiales con mejores prestaciones que permiten el aumento de tamaño de los aerogeneradores de eje horizontal o el rendimiento de los generadores entre otros avances. El diseño se ha visto reflejado en los aerogeneradores de eje vertical que permiten situar los molinos más cerca unos de otros aumentando el aprovechamiento de la superficie ocupada. Además suponen un riesgo menor para las aves que no se ven amenazadas como con las palas de los de eje horizontal, lo que disminuye su impacto.

El impacto visual se genera al necesitar de emplazamientos llanos sin irregularidades que facilitan su visión en parajes naturales. Guarda relación con la baja densidad de

energía al haber en la mayoría de los casos muchos molinos. Los aerogeneradores de eje vertical reducen este impacto al tener un diseño más estético que los de eje horizontal.

Por otra parte es necesario indicar que el aprovechamiento de la energía eólica no implica que tenga que haber extensos campos ocupados por aerogeneradores de grandes dimensiones. Existen modelos para entornos urbanos o rurales de menor tamaño y de uso no comercial, como el proyecto a estudiar. Y en algunos casos forman parte del paisaje de una zona, no solo no creando un impacto visual negativo si no añadiendo valor al paisaje, aquí es donde se encuentran los molinos manchegos.

A pesar de que su uso se había limitado a un fin paisajístico este proyecto busca relanzar una figura tan clásica tanto para la comunidad manchega como para toda España sirviendo a parte como apoyo a las energías renovables, en concreto la eólica. De esta forma convergen la tradición y la innovación en un solo proyecto.

1.1 Marco de desarrollo del proyecto

El ingeniero encargado del proyecto acudió a la Escuela solicitando ayuda para subsanar los fallos actuales que presenta el molino tras varios intentos fallidos de mantener el aerogenerador en funcionamiento estable. Este proyecto profundiza en la parte mecánica, una de las tres divisiones en las que consiste la colaboración en el proyecto del molino manchego. Por esta razón el trabajo se ha realizado en el departamento de ingeniería de máquinas mientras que las otras partes se han realizado en el departamento de máquinas eléctricas y en el de fluidos, según estudiaban la parte eléctrica con el alternador o el comportamiento aerodinámico en las palas respectivamente.

Para desarrollar el proyecto ha sido necesario mantener un estrecho contacto con el solicitante debido a la ausencia de fichas y datos de varios elementos como consecuencia de problemas previos con el proveedor de los componentes.

1.1.1 El molino

La idea del molino surgió como respuesta estética a la necesidad de un cobertizo para unas baterías. La propuesta inicial era simplemente realizar una construcción con el aspecto externo de un molino manchego pero sin ninguna otra funcionalidad que la de servir de refugio de las baterías. Fue a partir de esa idea cuando la Fundación Carral decidió aprovechar esa oportunidad para ampliar su fondo educativo.

El molino manchego generaría electricidad siendo otra fuente de energía renovable más adoptada por la fundación. La energía generada no se inyecta en la red debido a la mayor

dificultad que supone, su función es alimentar una resistencia trifásica encargada de calentar el agua de un tanque de almacenamiento para su uso corriente en el albergue. De esta forma se eliminan los trámites que se necesitan cuando se inyecta corriente en la red y se asegura que nunca se encuentre en vacío. El tanque consta de

Para desarrollar el proyecto se acudió a la empresa (Solener) como proveedor de los materiales y como encargado se encontraba Julio Pacheco, encargado también de la solar fotovoltaica en el albergue pero sin pertenencia a Solener. Para este último el molino ha supuesto su primer contacto con un proyecto de estas características.

Una vez se hubo construido se probó a ponerlo en funcionamiento. A partir de ese punto se constató la falta de cálculos previos por la aparición de diversos fallos que se explicarán con detalle más adelante. Sin embargo es necesario destacar cuales han sido las dos causas principales de los fallos: las imperfecciones en piezas y uniones y el elevado peso de los elementos, góndola, estructura y eje.

A estos fallos constructivos les sucedieron una degradación en las relaciones con la empresa proveedora de los materiales que se empezó a distanciar y comenzó a retrasarse en las entregas y dejó de aconsejar al ingeniero encargado. Esto ocasionó un enorme retraso en el arreglo de los fallos y la necesidad de buscar los materiales a otros proveedores, esta vez tratando con empresas dedicadas específicamente a cada campo, como SKF para rodamientos y apoyos, herreras de Toledo para elementos más sencillos como el soporte de la multiplicadora y otra para la multiplicadora misma.

El molino llegó a funcionar breves períodos de tiempo mientras aguantaban los apoyos lo que permitió darse cuenta de algunos inconvenientes de la multiplicadora o del sistema de transmisión.

Actualmente el molino se encuentra parado, sin las velas, y se está estudiando instalar una veleta que aparte de determinar la dirección del viento sea capaz de almacenar la información y transmitirla para realizar un estudio eólico en el emplazamiento y poder calcular las curvas de la potencia generada en relación al viento.

Como se puede ver el molino ha ido avanzando mediante el método de prueba-y-error. Este proyecto busca mejorar el comportamiento a partir de cálculos previos para la posterior implementación de medidas y evitar así proseguir con gastos que no certifiquen el funcionamiento.

1.2. Recurso eólico

La energía eólica es aquella producida a partir del viento, el cual se genera debido al desigual calentamiento de la superficie terrestre.

La radiación solar incide de manera informe en la superficie y ocasiona la aparición de regiones de mayor temperatura que otras. Las masas de aire de mayor temperatura

ascienden debido a la reducción de su densidad lo que provoca el arrastre de masas de aire más frío para ocupar el espacio abandonado por el aire ascendente. En lo alto de la atmósfera este aire se enfría y vuelve a caer generando nuevos desplazamientos de la masa atmosférica. Se forma por tanto un movimiento convectivo constante.

El aire en movimiento es lo que se denomina como viento. Las condiciones que regulan estos movimientos de masas de aire, es decir de viento, son altamente irregulares. Se ven afectadas por los gradientes de temperaturas en la superficie como ya se ha explicado pero también condiciona su comportamiento el hecho de que la Tierra gire sobre su propio eje, la situación de las nubes en la atmósfera y el distinto comportamiento térmico entre océanos y continentes.

Como toda masa en movimiento el viento posee una energía cinética que es la que se busca aprovechar con molinos y aerogeneradores. Esta energía sufre dos transformaciones antes de poder ser utilizada para el objetivo que se busca: debe pasar a energía mecánica de rotación a través de las palas y finalmente transformarse en energía eléctrica mediante el alternador. Esta última conversión tiene un rendimiento alrededor del 95% por lo que no se generan casi pérdidas, es en la primera transformación donde se desaprovecha gran parte del potencial eólico.

Según dicta la ley de Betz la máxima energía que se puede obtener del viento es un 59%, y teniendo en cuenta que no se alcanza ese valor con los álabes actuales de las turbinas de viento, la aerodinámica de las palas del molino analizado es claramente una fuente mayor de pérdidas.

1.2.1. Velocidad del viento

La energía eólica puede alcanzar valores extremadamente altos tanto por la masa desplazada como por la velocidad a la que lo hace, sin embargo esto no siempre es una ventaja. Su elevada irregularidad rebaja en gran medida su valor como fuente de energía renovable, inagotable e inocua para el medio ambiente.

El viento es un recurso cambiante que provoca que los conjuntos encargados de aprovecharlo estén dotados de amplia versatilidad para poder adaptarse a su comportamiento. La idea es ser capaz de obtener energía para cualquier dirección o velocidad del viento. Esto se ve limitado mecánicamente tanto superior como inferiormente, para velocidades demasiado bajas el viento no aportará la suficiente potencia para mover las palas, y para velocidades excesivamente altas el aerogenerador corre el riesgo de sufrir fallos mecánicos por los elevados esfuerzos por lo que debe ser capaz de orientarse de tal forma que los minimice.

El resultado del movimiento de masas de aire no consiste únicamente en la obtención de energía eléctrica, los esfuerzos mecánicos a los que se ven sometidos las estructuras son

uno de los factores a tener en cuenta en cualquier proceso de construcción de cualquier edificación con una mínima altura como refleja el Eurocódigo 1 que se utilizará más adelante. De este modo se aprecia la importancia del estudio del recurso eólico para este trabajo, como razón de ser del molino y como causa de algunos esfuerzos estructurales, los cuales son el objeto de estudio de este proyecto.

La velocidad media del viento es de entre 3 y 7 m/s por lo que el molino en nuestro caso o cualquier otro aerogenerador debe adecuarse para poder trabajar en ese rango.

Una razón de las variaciones del viento es temporal, se puede hablar de:

- variaciones estacionales.
- variaciones diarias.
- variaciones ráfagas.

Existen otros tres factores que determinan el comportamiento y los valores del viento en un emplazamiento determinado.

Variación del viento con la existencia de obstáculos

Los obstáculos como edificios, árboles o accidentes en el terreno crean una zona de turbulencia a su alrededor y la consecuente disminución de la velocidad del viento. Su región de influencia no es fija pero siempre es mayor en la zona de sotavento, por donde sale el viento, que en barlovento, lado en el que incide el viento en el obstáculo. La zona de turbulencias puede alcanzar 10 veces la altura del obstáculo en sotavento mientras que solo 2 en barlovento.

Variación de la velocidad con la orografía

Del mismo modo que se ha visto que la rugosidad del terreno influye en la velocidad es importante ver como la forma o relieve del mismo afecta. Un relieve escarpado con marcadas pendientes reduce la velocidad, frena al viento, en cambio elevaciones con pendientes más suaves pueden lograr un aumento de la velocidad del viento funcionando como una tobera.

Variación de la velocidad con la altura

La velocidad del viento varía con la altura comportándose como cualquier fluido cuando se aleja de la superficie fija. La razón de este comportamiento es la aparición de turbulencias causadas por irregularidades en la superficie del terreno. También podrían considerarse las causadas por el gradiente de temperatura pero su influencia es mínima en una diferencia de alturas de 30 metros.

Según se aleja el fluido, en este caso el aire del terreno los efectos del rozamiento con la superficie disminuyen aumentando la velocidad del viento hasta estabilizarse en una velocidad límite o velocidad nominal que es la que posee el viento cuando no se ve afectado por rozamientos. Cuanto menos irregularidades presenta la superficie menos frenado se ve el aire alcanzando la velocidad nominal a una altura menor, siendo el gradiente de velocidad mayor.

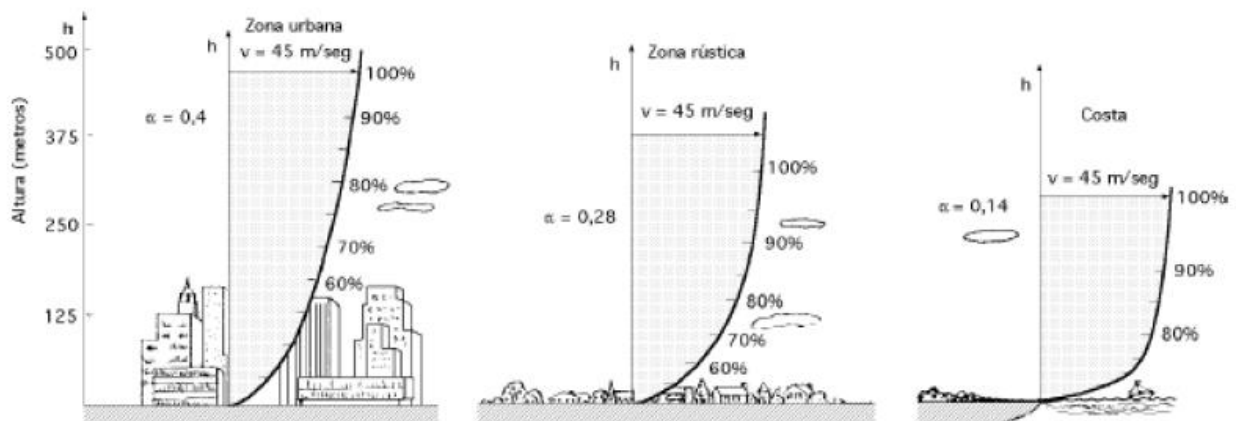


Figura 1. Variación del viento con la altura

Velocidad del viento en el molino

El molino a estudiar posee una altura de 15m donde las aspas están situadas en la parte más alta. Este diseño consigue reducir las pérdidas de velocidad del viento por altura y presencia de obstáculos.

Utilizando los mapas eólicos se puede estimar con un error relativamente pequeño la velocidad media anual en la zona donde se erige el conjunto. Este se encuentra en Toledo, en los últimos mapas está marcado con el globo de información. En todas las imágenes la leyenda utilizada para reflejar las velocidades es la misma:

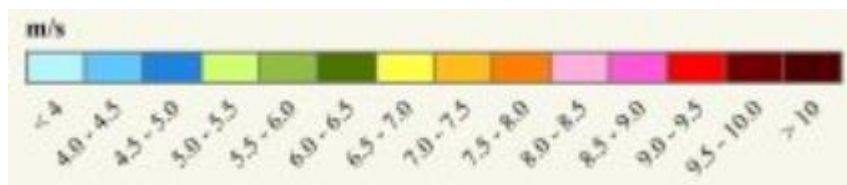


Figura 2. Leyenda de los mapas eólicos

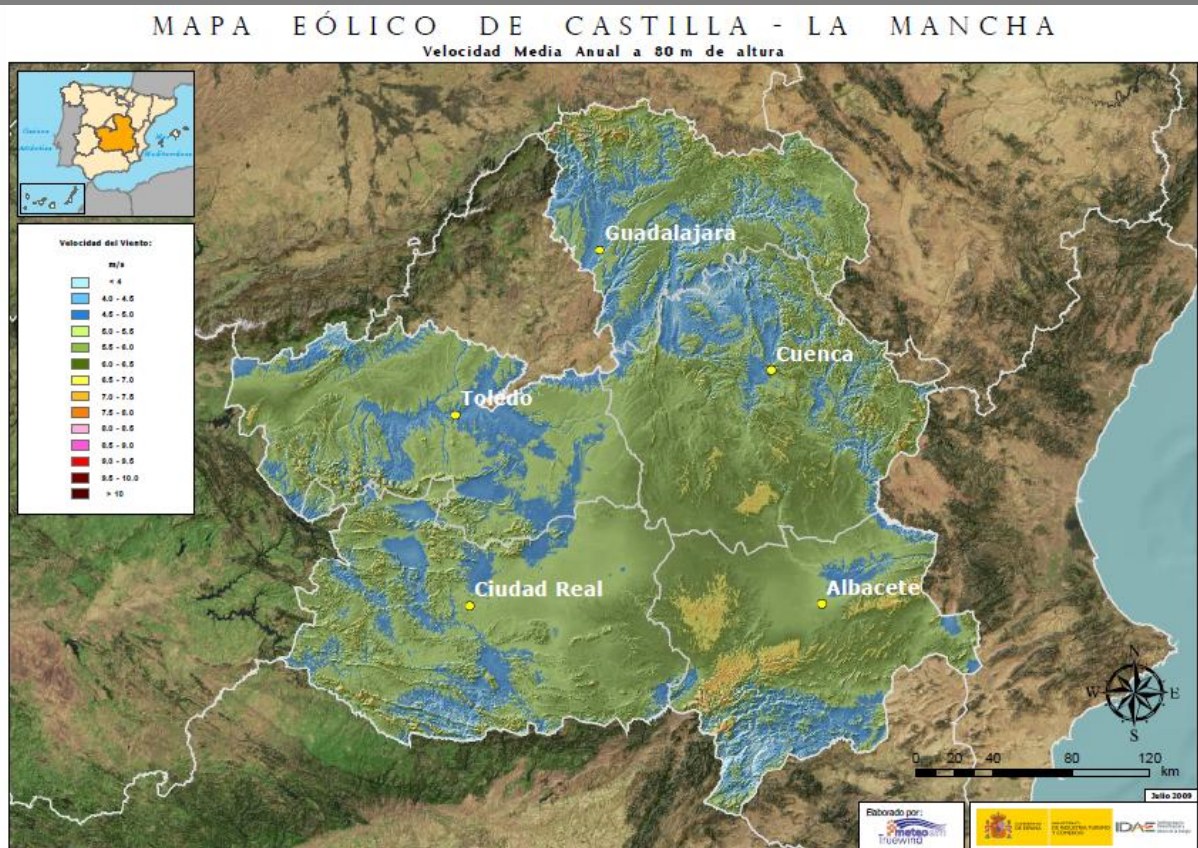


Figura 3. Mapa eólico de Castilla-La Mancha a 80m

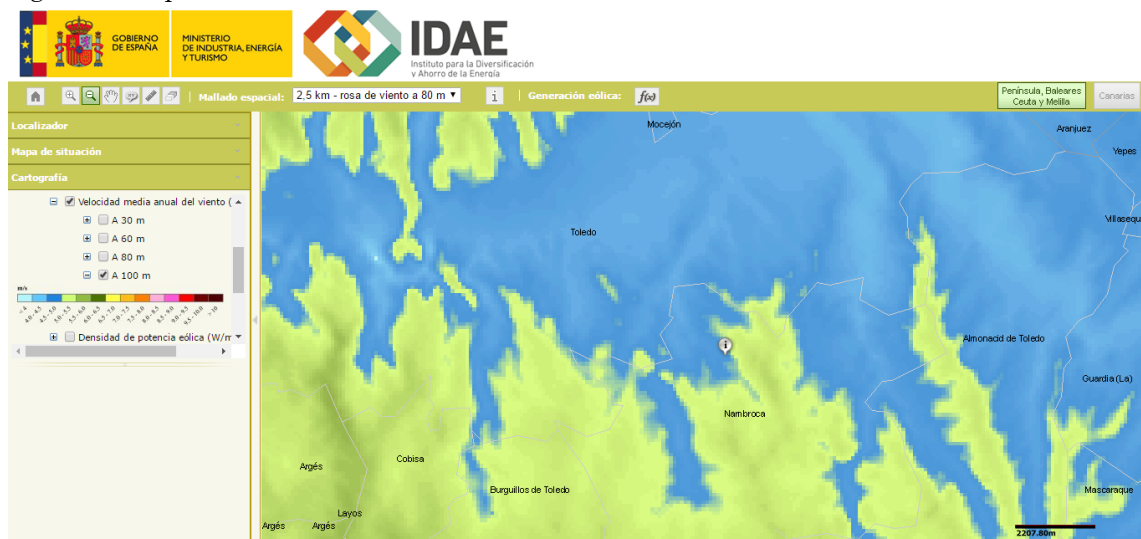


Figura 4. Mapa eólico del casar de la Inesa a 100m

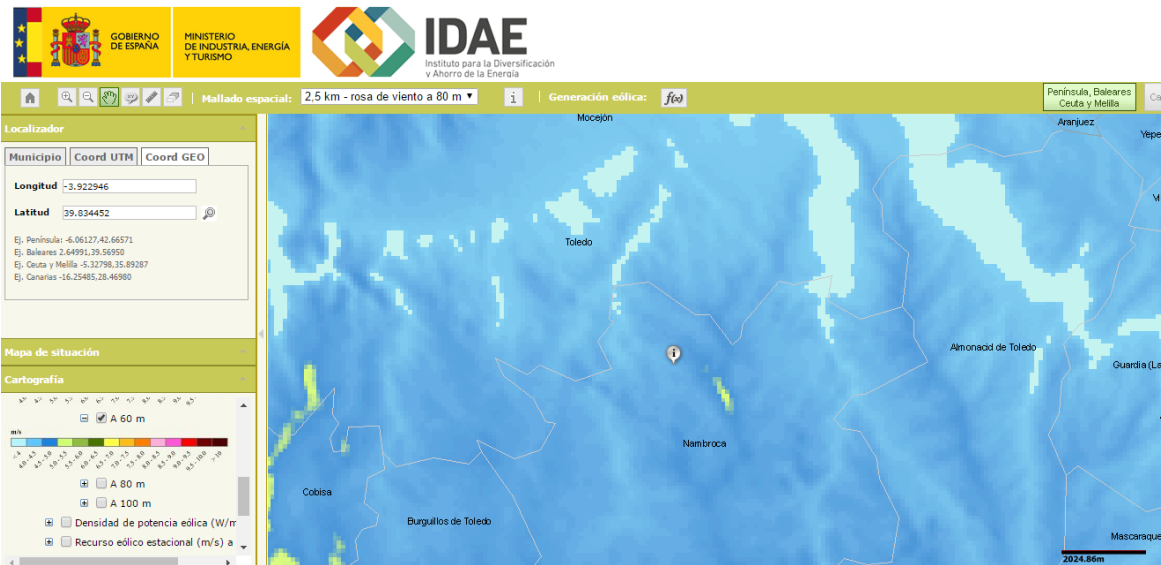


Figura 5. Mapa eólico del Casar de la Inesa a 60m

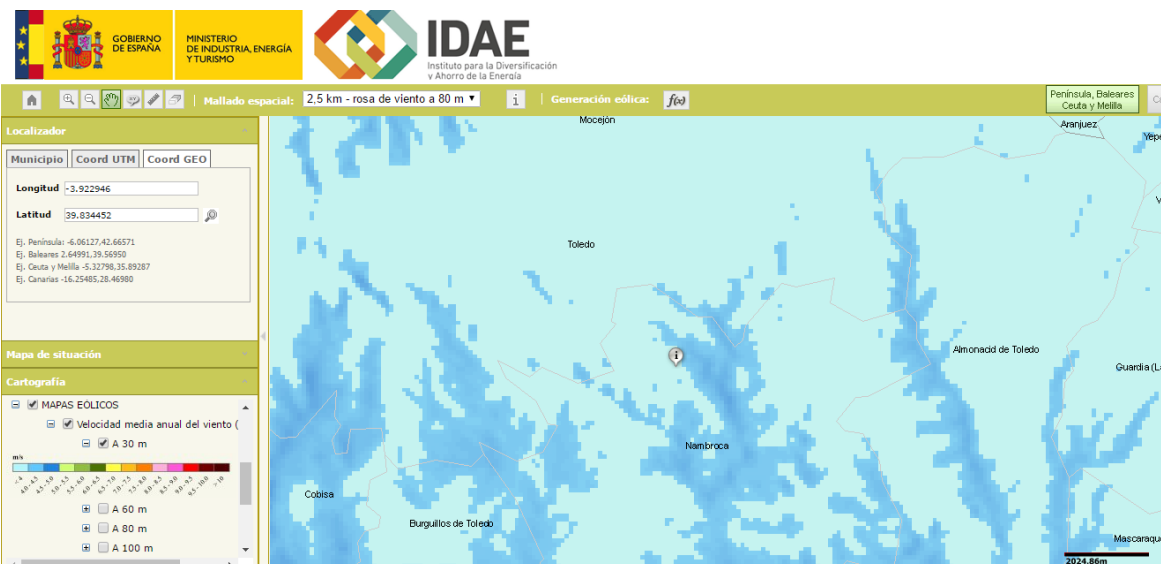


Figura 6. Mapa eólico del Casar de la Inesa a 30m

Se aprecia claramente la disminución de la velocidad a medida que disminuye la altura.

El Instituto para la Diversificación y ahorro de la energía también ofrece datos sobre las variaciones estacionales del viento en el lugar de estudio.

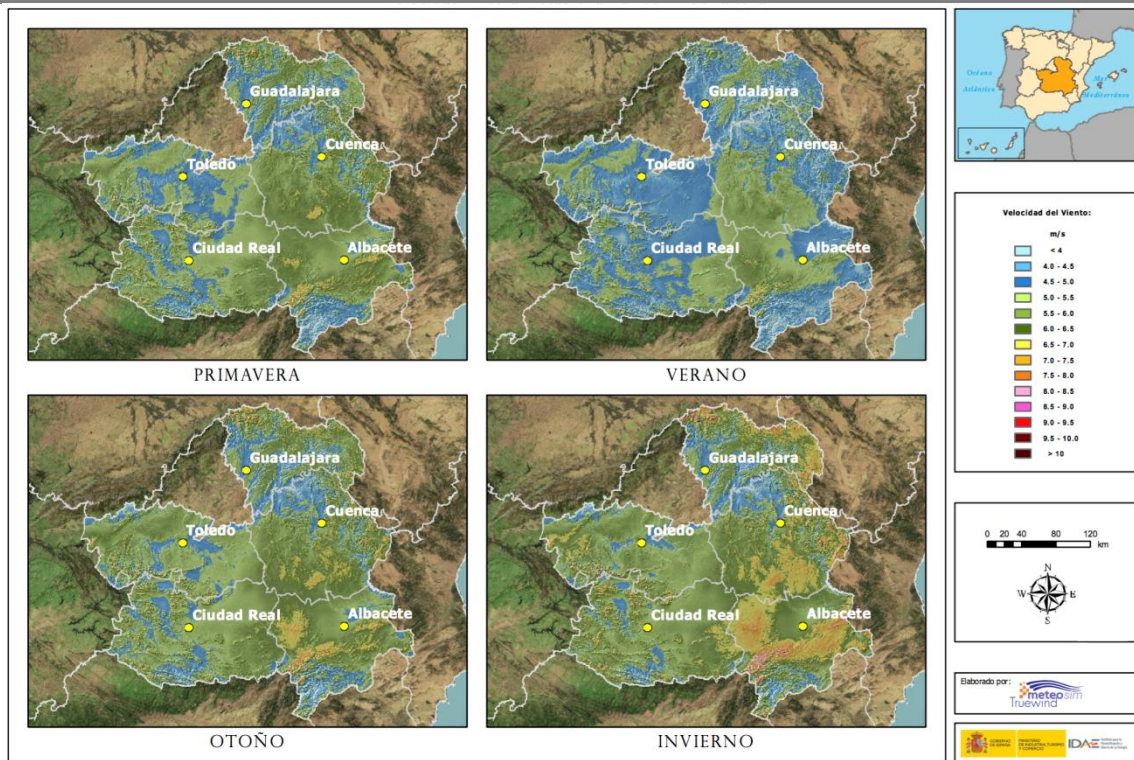


Figura 7. Velocidades medias del viento a 80m según los diferentes períodos estacionales.

En cuanto a orografía se refiere el paisaje manchego en el que se encuentra no tiene pendientes pronunciadas ni accidentes en el terreno. Como ya se ha mencionado esto favorece que la velocidad no se vea reducida. Sin embargo existe un obstáculo excesivamente cercano que con total seguridad crea una zona de turbulencias que afecta al molino. Se trata del almacén contiguo que se aprecia en la foto.



Figura 8. Panorámica del terreno circundante

Según el mapa eólico de la velocidad media anual a una altura de 30 metros la velocidad del viento en la zona donde está construido es prácticamente de 4 m/s.

Llegado a este punto es necesario acudir al Eurocódigo 1 para determinar los coeficientes característicos de la orografía según el terreno y así identificar qué perfil de velocidades sigue el viento en este caso. Para esta tarea la normativa establece diferentes categorías de terrenos:

Categoría del terreno		z_0 (m)	z_{min} (m)
0	Mar abierto o zona costera expuesta al mar abierto	0,003	1
I	Lagos o áreas planas y horizontales con vegetación despreciable y sin obstáculos	0,01	1
II	Áreas con vegetación baja, como hierba, y obstáculos aislados (árboles, edificaciones) con separaciones de al menos 20 veces la altura de los obstáculos	0,05	2
III	Áreas con una cobertura de vegetación uniforme o edificaciones o con obstáculos aislados con una separación máxima de 20 veces la altura de los obstáculos (villas, terreno suburbano, bosques permanentes)	0,3	5
IV	Áreas en las que al menos un 15% de la superficie está cubierta por edificios cuya altura media supera los 15 m	1,0	10

Tabla 1. Categorías del terreno

Atendiendo a las descripciones y las ilustraciones que se muestran en el Eurocódigo se determina que el terreno sobre el que se ha edificado el molino es de categoría II, donde z_0 es la rugosidad.

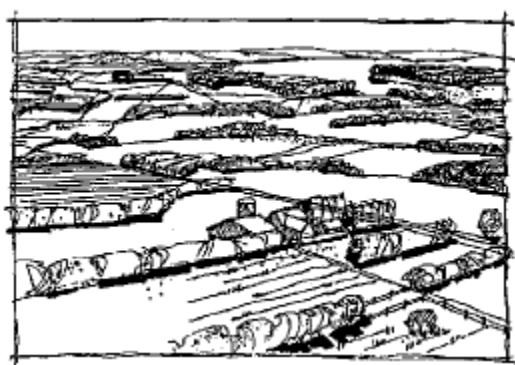


Figura 9. Ilustración Eurocódigo 1 Categoría de terreno II

Como ya se ha comentado la orografía del terreno modifica la velocidad del viento de diversas formas a diferentes alturas. Para determinar la influencia que esta característica tiene existen fórmulas que se sirven del factor de rugosidad para ello.

$$v = v_{ref} \cdot \left(\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \right)$$

Definiendo z como la altura, a la cual queremos hallar la velocidad, z_0 como el factor de rugosidad y z_{ref} como la altura en la que se encuentra el viento medido.

Sabiendo que nuestro emplazamiento se encuentra a un nivel de 599 m y dado que nuestro molino mide 9,5 m de altura, podemos calcular la velocidad a esta altura, conociendo que la estación meteorológica se sitúa a un nivel de 600m y la velocidad a 30 m en el lugar en el que estamos realizando los cálculos.

$$v_m = v_{ref} \cdot \left(\frac{\ln \frac{z}{z_0}}{\ln \frac{z_{ref}}{z_0}} \right) = 3,85 \text{ m/s} \cdot \left(\frac{\ln \frac{8,5\text{m}}{0,05\text{m}}}{\ln \frac{30\text{m}}{0,05\text{m}}} \right) = 3,09 \text{ m/s}$$

1.3. Estado del arte

Las instalaciones eólicas aprovechan y transforman la energía del viento para un fin en concreto, siempre desde una posición fija, sin desplazamientos.

Actualmente se ha conseguido aprovechar la energía del viento sin partes móviles, aunque aún no haya ninguna instalación comercial de este tipo. Se trata de un proyecto pensado para ser construido en Rotterdam y que aprovecha la energía del viento para mover partículas cargadas. Este transporte es el que genera la energía eléctrica por lo que no necesita de componentes rotativas o móviles.

Sin embargo la forma más común a día de hoy y que se ha venido usando desde hace siglos se basa en transformar la energía eólica en movimiento de rotación mediante un número determinado de aspas según la época, la cultura y la tecnología al alcance. Este movimiento rotativo se utiliza según la finalidad de la instalación eólica para diversos fines, ya sea la generación de energía eléctrica, la molienda del grano o el bombeo de agua entre otros.

1.3.1. Clasificación de las instalaciones eólicas

Para realizar una clasificación de las distintas construcciones encargadas de aprovechar la energía transportada por el viento se puede atender a una gran variedad de criterios. Se realizará su estudio partiendo de rasgos más generales para finalizar en los específicos.

Según la orientación de su eje:

- **Eje horizontal:** Los de mayor uso y los únicos existentes hasta hace relativamente poco tiempo. Las palas se encuentran siempre en la parte más alta para aprovechar más la velocidad del viento y necesitan orientarse frente a este para poder extraer energía de él. El sistema de orientación antiguamente consistía en

una estructura que iba de la cabeza, cúpula o góndola del molino hasta el suelo para que el operario pudiese orientarlo de frente al viento.

Se considera a los molinos de eje inclinado como el molino manchego instalación de eje horizontal debido a su leve inclinación y similitud en el funcionamiento y comportamiento a la hora de aprovechar la energía eólica con los verdaderamente horizontales.



Imagen 10. Turbinas de eje horizontal

- **Eje vertical:** Actualmente existen varios modelos como el Darrieus y el Savonius pero comparten unas características comunes. No necesitan orientarse ni poseen una estructura tan fuerte como los de eje horizontal.



Imagen 11. Turbina Darrieus de eje vertical

Según el número de palas:

La elección del número de palas o álabes en un molino o generador eólico responde fundamentalmente a razones estructurales. Se busca hallar un punto óptimo entre el máximo aprovechamiento de viento y unos esfuerzos mecánicos reducidos.

Los aerogeneradores actuales de eje horizontal tienen la gran mayoría tres álabes, los de eje vertical suelen presentar dos. Molinos más antiguos como el holandés o el manchego utilizan cuatro palas para captar el viento y otros como el americano o el mallorquín tienen alrededor de 20 álabes.



Imagen 12. Molino americano

Según su utilidad

- **Aerogeneradores** o generadores de energía eléctrica. Aprovechan el movimiento rotativo para generar electricidad mediante un alternador, suelen necesitar de una multiplicadora para adecuar la velocidad de giro. Es el caso del molino objeto de estudio de este proyecto.
- **Molienda de grano.** Mediante engranajes traslada el movimiento de rotación a la piedra encargada de moler el grano.
- **Bombeo de agua.** Muy utilizado en las tierras por debajo del nivel del mar para ganarle terreno, el ejemplo es el de los molinos holandeses, aunque también se usaba para llevar el agua de los pozos a las casas y a los campos de cultivo en estados unidos. Todos ellos utilizan el movimiento rotativo para bombear, no existen más transformaciones.

Según su época y procedencia

Históricamente cada país recibió la tecnología del molino de viento y lo adaptó según sus necesidades, materiales y tecnología. La época de construcción y desarrollo de un tipo en concreto de molino responde también a estas características. Es en la procedencia donde es necesario situarse en una época anterior. Manteniendo a un lado los aerogeneradores, más característicos de un mundo globalizado donde resulta extremadamente difícil distinguir la procedencia de la turbina de viento por su diseño sí es fácilmente identificable de donde viene cada molino antiguo solo con verlo.

El molino manchego es de eje horizontal de cuatro palas utilizado para la molienda, el holandés comparte los mismos rasgos excepto que se utiliza para bombeo entre otros.

1.3.2. Transformaciones de molinos clásicos

La energía de hoy es sin duda la energía eléctrica. La inmensa mayoría de los aparatos que nos rodean se basan en su conversión. O transforman otro tipo de energía en electricidad para poder transportarla o almacenarla, o convierten esta energía eléctrica en una adecuada para cumplir su función. La razón principal es la facilidad que ofrece para llevarla hasta el lugar donde se necesita y la precisión que aporta.

Objetos que no la necesitaban para su funcionamiento ahora la han incorporado. Un ejemplo de ello es la electrónica en los coches, paulatinamente se van sustituyendo mecanismos de activación y transmisión mecánica por sistemas electrónicos. Las tecnologías antiguas deben adaptarse a las nuevas para que no se pierdan. La restauración y modernización de molinos no es si no otro caso más.

En Europa existen miles de molinos en ruinas de los que apenas se mantiene parte de su estructura en pie, sin embargo muchos otros han conseguido superponerse a los avances tecnológicos y así seguir existiendo. Inglaterra y Francia se posicionan como los países que más aprovechan la transformación de antiguos molinos en alojamientos rurales o restaurantes para incrementar el turismo. Esta práctica es cada vez más habitual en Europa, donde muchos países poseen molinos abandonados y se busca crear negocio mediante la restauración.

Afortunadamente existen molinos donde la restauración no implica únicamente adecuar el interior del edificio si no que mantienen parte de la tecnología para aprovechar la energía mecánica obtenida mediante el giro de las aspas producido por el viento.

Las razones para invertir fondos en el mantenimiento o adaptación de esta tecnología se fundamentan principalmente en el interés en preservar el patrimonio cultural del lugar al que pertenecen. La búsqueda del beneficio económico nunca es la causa principal ya que con las tecnologías existentes sería más factible servirse de turbinas de viento

modernas para obtener la energía necesaria debido a su mayor rendimiento y normalización.

En Holanda existe un ejemplo donde se mantienen molinos funcionando con la tecnología original que se emplea para moler varios productos. Se encuentra en Zaanse Schans y lo conforman 10 molinos operativos encargados de moler olivas, especies y pigmentos para pintura en los cuales el viento llega a mover rocas de 3.000 kg encargadas de la molienda.

Este es el ejemplo más claro de cómo mantener el interés histórico, sin embargo en este proyecto se busca el equilibrio entre el legado cultural y las nuevas tecnologías. Lo que implica este equilibrio, que es lo que se ha hecho en el conjunto a estudiar, es utilizar una instalación eólica clásica, ya sea original o simplemente mantenga su diseño, para generar energía eléctrica. Esto supone cambiar el sistema de transmisión y engranajes por otro que lleve a un alternador, normalmente el sistema de transmisión y engranajes clásicos se sustituyen por una multiplicadora que precede a la máquina generadora.

La adecuación de molinos típicos de una zona en aerogeneradores se puede observar con frecuencia en Estados Unidos. Sus molinos poseen una estructura más fina, una complejidad menor y unas dimensiones tremendamente reducidas si se comparan con molinos europeos. Esta diferencia de tamaño y simplicidad se refleja también en una disparidad en las masas de miles de kilos.

En este proyecto se ha considerado que el cambio en los molinos americanos no es equivalente al realizado en el conjunto objeto de estudio. Su régimen de revoluciones es superior a los molinos europeos clásicos, entre 20 y 35 rpm, ofrecen un par mucho menor por su menor masa, una potencia máxima alrededor de 1kW y su función de bombeo de agua solía efectuarla a través del uso de bombas alternativas dado su elevado par de arranque principalmente.



Figura 13. Molino americano

Casos similares al que ocupa este proyecto se han encontrado dos. Uno en Inglaterra y otro en Holanda, cuyos molinos clásicos se asemejan al molino manchego.

NoletMolen, Schiedam, Holanda

El molino Nolet es un molino clásico holandés que, al igual que el molino de la Fundación Carral, no es una reparación de un molino antiguo en mal estado, es una construcción moderna que evoca este elemento histórico nacional.

Se levantó en 2005 como propiedad de la destilería Nolet en Schiedam, Holanda, y hace las veces de reclamo gracias a su diseño tradicional y su enorme altura, haciéndolo visible desde casi todos los puntos de la ciudad. Su otra función, ya en el plano tecnológico, consiste en alimentar una de las calderas de la destilería, objetivo prácticamente idéntico al proyecto estudiado en este proyecto.

Se trata de una construcción de hormigón revestida de ladrillo con forma tronco cónica. A pesar de su apariencia la tecnología que incorpora es totalmente moderna. El mejor ejemplo de esto son los perfiles aerodinámicos de las palas diseñados por la universidad de Delft, TU Delft. La presencia del sistema de orientación es meramente decorativa ya que el molino opera de forma autónoma sin necesidad de ningún operario. También cumple una función estética la terraza intermedia con las vallas de protección que sin embargo producen con total seguridad una pequeña región de turbulencia que disminuye el rendimiento del molino.

Con todo esto el molino suministra una potencia de 70 kW, dos veces más que un molino tradicional, y se espera que la producción de electricidad de este molino sea de 250.000 kWh por año.



Figura 14. Sistema de medida del viento del molino Nolet

Altura del edificio	25m
Vuelo	30m
Diámetro de acción	10m
Material del cuerpo	Hormigón y ladrillo
Material de la cúpula	Plomo
Potencia generada	150 kW

Tabla 2 Molino Nolet



Figura 15. Molino Nolet

Ringle Crouch Green mill

Situado en Sandhurst al sureste de Inglaterra se encuentra este molino de madera en funcionamiento. Su construcción surge como respuesta a la voluntad del pueblo de recuperar un molino tradicional que formaba parte del lugar.

Se trata de una réplica de un molino de maíz construido en 1844, el único en la región e Kent con 5 velas. Finalmente se demolió en 1945 dejándose la base en pie. Fue ya en 1997 cuando comenzó la construcción del molino existente sobre la base de su predecesor, intentando imitar al máximo el antiguo.



Figura 16. Antiguo molino Ringle Crouch

Actualmente el edificio base de cuatro plantas se utiliza como vivienda y sus cinco velas generan electricidad para esta en la estructura giratoria superior, la cúpula. Presenta una planta octogonal tanto en su base de ladrillo como en el edificio de madera sobre esta.

La tecnología interna es por tanto moderna aunque dista de la inversión realizada en el molino holandés Nolet. Los materiales utilizados para la cúpula son principalmente hierro y fundición y acero para el eje, posicionándose como la obra más cercana al molino manchego a estudiar.

Altura del edificio	18m
Longitud de las palas	12,5 m
Material del cuerpo	Ladrillo y madera
Material de la cúpula	Acero y fundición
Potencia generada	20 kW

Tabla 3. Molino Ringle Crouch



Figura 17. Actual molino Ringle Crouch Green

2. OBJETIVOS

Este proyecto se engloba dentro del encargo de solucionar los problemas del molino manchego generador por lo que el objetivo último consiste en lograr que entre en funcionamiento pero en concreto el presente trabajo se centra en la parte mecánica del mismo.

Los objetivos que se desean alcanzar por este trabajo son:

- Objetivo principal:

Determinar la carga que deben soportar los apoyos y aportar soluciones para conseguir la puesta en marcha del molino manchego. Esto implica las siguientes metas:

- Cálculo estructural del molino.
- Cálculo de las reacciones en los apoyos
- Ubicación de los apoyos.
- Selección de los apoyos de la góndola y propuesta de diseño para su colocación.

- Objetivos secundarios:

- Cálculo de la acción del viento
- Diseño del soporte de la multiplicadora que se debe utilizar.
- Propuesta para la ubicación de la multiplicadora.
- Actualizar los planos

3. REQUISITOS

Los objetivos mencionados previamente están sujetos a una serie de requisitos impuestos por la Fundación Carral y el ingeniero encargado solicitante de la ayuda. Estos requisitos responden a temas tanto económicos como constructivos, ya sea por facilidad constructiva o por minimizar el tiempo necesario de los cambios para lograr una puesta en marcha del molino lo más temprana posible.

Estos requisitos son:

- **Gasto económico reducido.** Siempre se deben barajar las opciones hasta obtener la que cumpla la función buscada y suponga un menor precio.
- **Cambio limitado de elementos:** Únicamente se permite cambiar los apoyos, eliminar los topes y reubicar los elementos existentes actualmente de la transmisión de potencia.
- **No alteración de la unidad estructural.** El aspecto por supuesto debe mantenerse ya que es la principal característica del conjunto. La estructura principal no se debe alterar ya que generaría la necesidad de un nuevo cálculo y la revisión de sus componentes
- **Reparaciones y montaje de soluciones en el mismo emplazamiento.** Y no se pueden trasladar piezas a talleres para realizar el montaje.
- **Personal encargado reducido y tecnología necesaria básica** para reparaciones y montaje. La idea es que se trate de tareas sencillas para poder reducir el presupuesto requerido.
- **Tiempo reducido** para realizar los montajes. El molino lleva dos años construido y sin poder entrar en funcionamiento. Se busca que comience a operar lo antes posible para que sirva de atracción mientras la fundación este activa.

4. ESTUDIO DEL CONJUNTO

Para poder realizar un análisis completo es necesario completar un estudio de la situación actual y objetivos de la construcción. A continuación se presenta una descripción del funcionamiento del conjunto y de sus elementos.

4.1. Funcionamiento

En este apartado se profundizará en los procesos presentes en el molino y en los elementos encargados de su correcto funcionamiento.

4.1.1. Captación eólica

El aprovechamiento de la fuerza de un fluido en la naturaleza es solo posible mediante la transformación de su energía en otra más manejable, es sin duda la base de todo molino. Tanto los fluviales como los eólicos necesitan transmitir la energía para lograr darle utilidad y para ello se usan las aspas, palas, álabes ...

Para cumplir con su cometido debe ser una estructura suficientemente ligera para que el viento sea capaz de moverla, rígida para mantener su forma de la cual depende la extracción de la energía cinética del viento que pasa por la superficie abarcada por las aspas, y debe tener un mínimo de flexibilidad que permita que no se fracture para altos esfuerzos.

En el caso objeto de estudio los elementos encargados de obtener la energía del viento son las cuatro aspas rectangulares. Situadas de forma simétrica respecto al eje de giro presentan una curvatura la cual permite la transformación del movimiento rectilíneo del viento en el giratorio del eje.

Como se puede apreciar en las fotografías se han colocado unos sensores metálicos en los extremos de las aspas de forma que se minimice el desplazamiento en la dirección perpendicular al eje de giro. En la segunda figura se puede ver perfectamente como la curvatura inicial se va suavizando a medida que se aleja del centro. Según se alejan del eje la curvatura disminuye ya que de lo contrario los esfuerzos que deben soportar serían excesivamente elevados.



Figura 18. Aspas del molino. Tensores



Figura 19. Aspas del molino. Curvatura

Material estructural	Tubos cuadrados de acero estructural
Longitud de un aspa	4,5 m
Área de un aspa	4,5m x 2m =9 m ²
Curvatura máxima	20 °
Curvatura mínima	10 °

Tabla 4. Aspas Molino de El Casar de la Inesa

Cuando se encuentra en funcionamiento se cubren con una tela de forma que el viento no se cuele por los agujeros de la estructura y empuja la tela contra esta. Debido a la curvatura las aspas comienzan a girar ya que poseen un punto fijo, el eje, que impide que se trasladen.

4.1.2. Transmisión de la potencia

Una vez se consigue tener el eje girando se busca transmitir ese movimiento al alternador para que éste pueda utilizarlo para producir energía eléctrica. El método elegido para ello son las cadenas.

La utilización de las cadenas presenta una desventaja añadida cuando el plano en el que se mueven no es el vertical porque implica que el peso de estas no es soportado por las ruedas dentadas y puede ocasionar holguras o deformaciones perjudicando el funcionamiento. Afortunadamente la inclinación del eje respecto a la horizontal es únicamente de 15° por lo que se puede suponer despreciable el efecto del peso de las cadenas sobre las mismas. Dada la disposición del eje y sus dimensiones obligan a utilizar cadenas, no es posible introducir engranajes intermedios que posibiliten la transmisión hasta el emplazamiento original de la multiplicadora.

Sin embargo el giro del eje es demasiado lento como para generar un campo eléctrico en el alternador, la cantidad de pares de polos que debería tener para alcanzar una frecuencia de 50 Hz sería excesiva por lo que es necesario una multiplicadora.

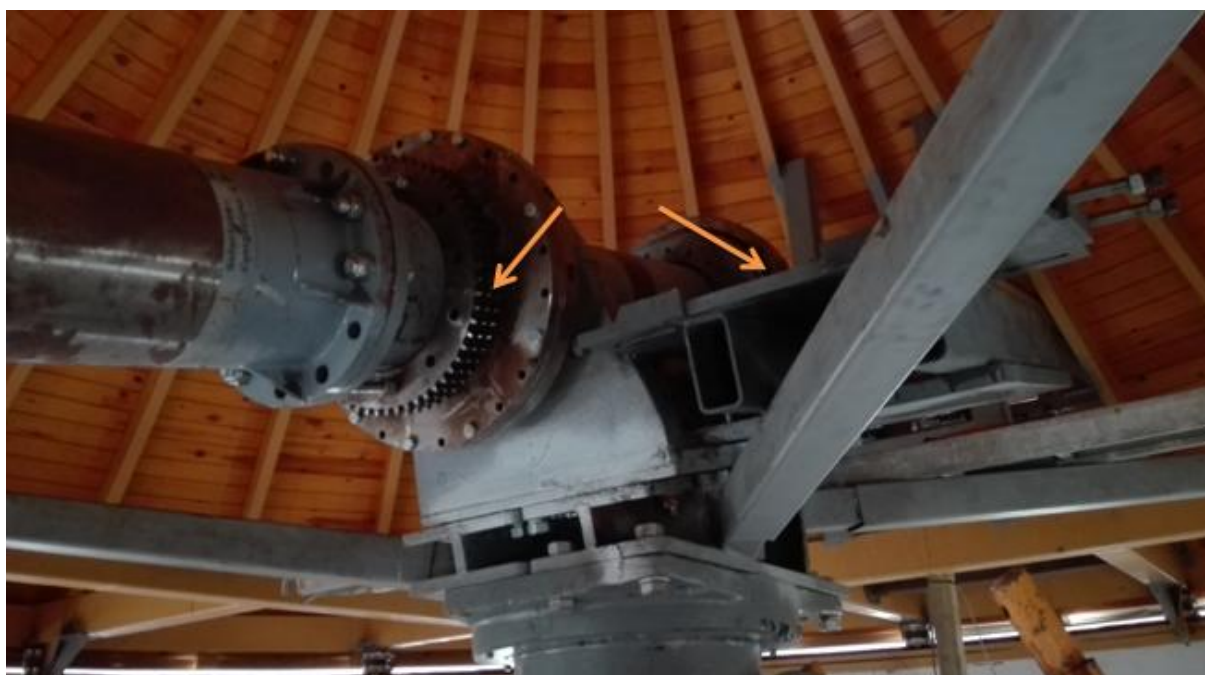


Figura 20. Transmisión en el eje

En el comienzo se utilizaba un multiplicadora que servía de transmisión para un alternador distinto al actual. Sin embargo al cambiar el alternador se tuvo que cambiar también la multiplicadora. Actualmente el molino se encuentra a la espera de una

multiplicadora que acople correctamente la velocidad de giro del eje con la velocidad necesaria para que el alternador genere electricidad, uno de los objetivos del presente proyecto.

Tanto la multiplicadora como el alternador acostumbraban a situarse en la plataforma contigua al eje, señalada en la fotografía. La cadena enganchaba las ruedas dentadas presentes en el eje con las respectivas de la multiplicadora que conectaba a su vez con el alternador con otra cadena.

4.1.3. Sistema de orientación

Un molino con las aspas y la transmisión de potencia puede funcionar perfectamente, el problema es que solo absorbería la energía transportada por el viento en el caso en que este llegase de frente, de cualquier otra manera difícilmente lograría moverse. Por esta razón los molinos cuentan con un sistema de orientación respecto al viento, para poder aprovechar al máximo el recurso.

El molino en cuestión no es diferente, para orientarse utiliza los sistemas modernos, no como el molino manchego clásico que era orientado a través de la cola movida por una persona. Este molino se sirve de una veleta situada en la construcción más próxima para detectar la velocidad y dirección del viento y en función de esto envía un señal al motor encargado de orientar la cúpula situado en el eje central para colocar las aspas de frente al viento. El sistema está programado para cubrir 370° de forma que si el molino está en uno de sus límites y debe girar la cúpula unos grados más para ponerse de frente al viento el motor deberá girar en sentido contrario casi una vuelta hasta alcanzar la orientación adecuada. Esto se realiza de esta manera para evitar que los cables del alternador y multiplicadora acaben enrollados en el eje soporte central y dañen los aparatos y evitar la utilización de un sistema de cepillos que permitiría girar de forma ilimitada en una dirección pero donde su implementación es de una complejidad excesiva, su rendimiento no es tan alto como con cables y en un ambiente agresivo como este con polvo continuamente circulando se acabaría acumulando y dando fallos.



Figura 21. Motor de orientación

El anemómetro es el modelo 05103 fabricado por R.M. YOUNG COMPANY. Se trata de una veleta pequeña y ligera cuyas características principales se reflejan en la tabla que aparece a continuación. Sus rodamientos son de acero inoxidable con las superficies de contacto fijas de teflón para lograr un mayor ajuste. Utiliza un alternador de tres pares de polos para generar el campo eléctrico y con él la diferencia de potencial proporcional a la velocidad con la que el viento incide en los álabes.

Características de la veleta

Rango de velocidades de trabajo	0-100 m/s
Material de las aspas	Polipropileno
Precisión	± 1 m/s
Rango de temperaturas de trabajo	-50 a 50 °C
Número de aspas	4
Diámetro de actuación	18 cm

Tabla 5. Veleta de orientación

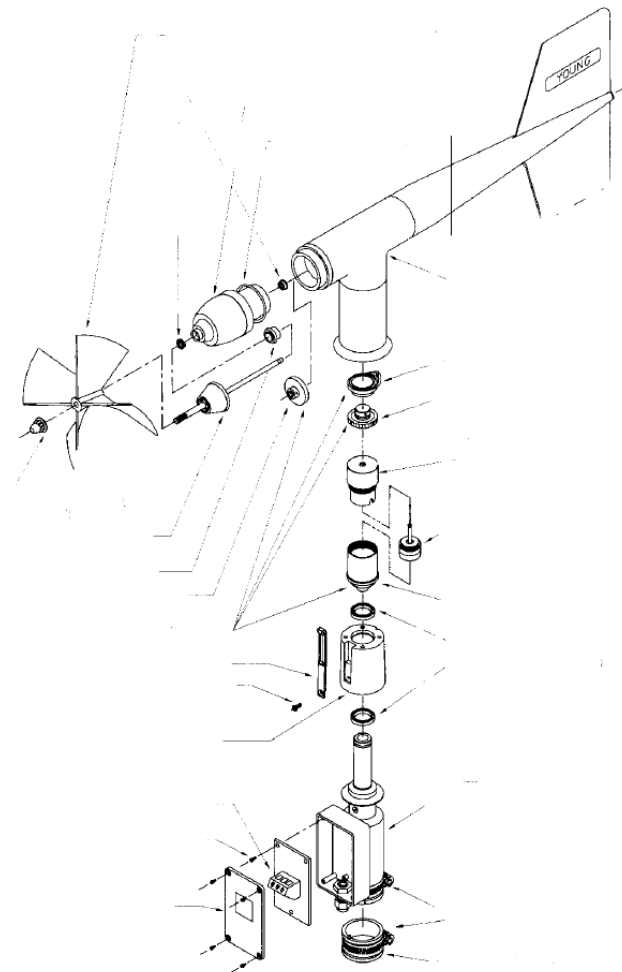


Figura 22. Veleta anemómetro.

4.1.4. Alternador

Para poder transformar la energía cinética de rotación en electricidad la fundación cuenta con un alternador de 16 pares de polos de imanes permanentes de 10 kW que se conectaría a la multiplicadora. Este alternador es de frecuencia y tensión variable y posee un sistema de freno automático con resistencia



Figura 23. Alternador

Características Alternador

Diámetro	465 mm
Profundidad	210 mm
Pares de polos	16
Intensidad a producir	10 A
Frecuencia de trabajo	47,3 Hz
Régimen exigido	177 rpm

Tabla 6. Alternador

Al mismo tiempo que se realizaba el presente trabajo en el departamento de máquinas eléctricas se diseñó una bancada en un proyecto paralelo para poder realizar los ensayos pertinentes al alternador con el objetivo de obtener sus curvas de potencia para delimitar la carga y el rango de trabajo adecuado.

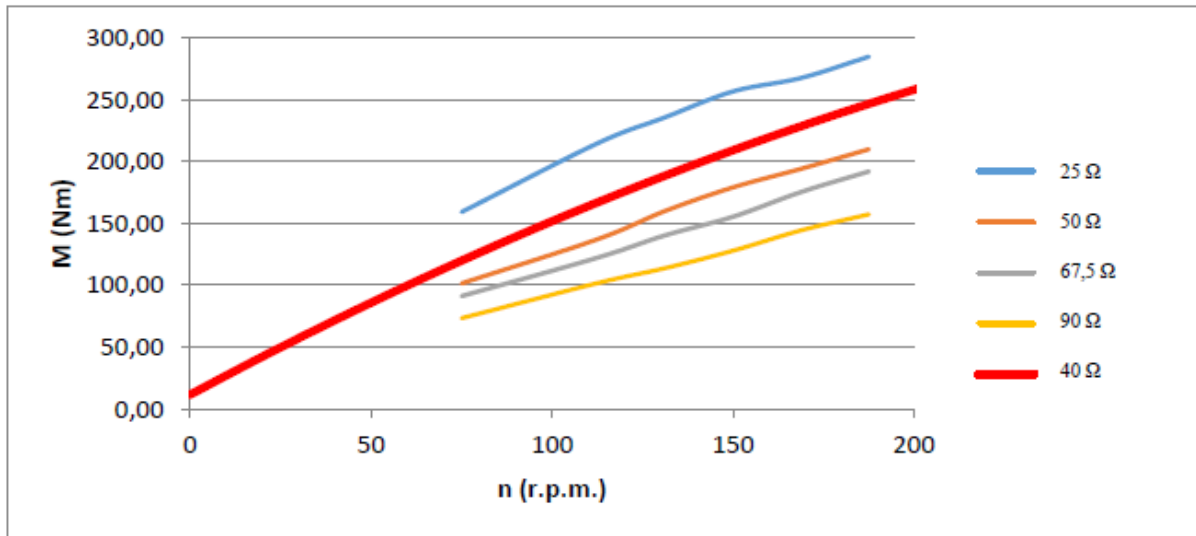


Figura 24. Curva alternador

A partir de las características del alternador y la resistencia con la que se va a trabajarse obtiene la curva de par de trabajo del generador. Junto con las obtenidas tras el estudio de las aspas, donde se obtuvo la curva de par producido por estas se puede establecer el modelo de multiplicadora necesaria.

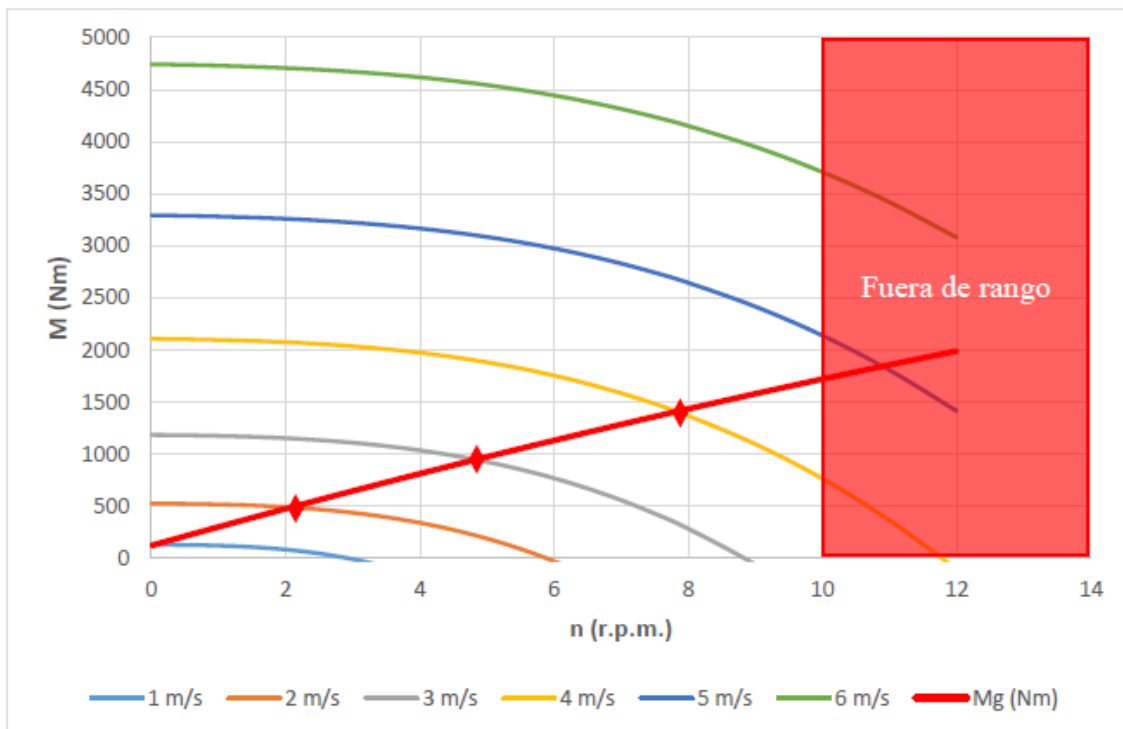


Figura 25. Puntos de funcionamiento de la multiplicadora

En este caso la velocidad angular que figura en el eje horizontal no corresponde con el régimen de giro del generador si no de las aspas del molino, y las curvas que intersectan al par del alternador son las curvas de par producidas por las distintas velocidades del viento que aparecen.

4.1.5. Resistencia

La energía eléctrica generada debe tener una finalidad, en este caso es calentar el agua de la caldera. Para ello se sirve de una resistencia trifásica de 40 Ohmios conectada al alternador que como se comentó con anterioridad genera una corriente trifásica.

Esta resistencia debe ser capaz de calentar los 1000 litros de agua de la caldera para lo que se calcula que necesita un tiempo variable según la potencia suministrada por el molino que se encuentra alrededor de 100 horas.

4.2. Problemas

Tras la descripción de los elementos que conforman el molino y las funciones que cumplen se va a proceder a la exposición de los problemas existentes en relación a estos. En posteriores apartados se detallarán las soluciones propuestas para subsanar estos fallos.

4.2.1. Material de las aspas

La estructura de las aspas, como ya se analizó previamente, está hecha en su totalidad de acero estructural. La densidad de este material es de 7833 kg/m³ y se considera excesivamente pesado para la tarea que desempeña en este caso. El peso de la estructura, aunque aporta inercia al conjunto, disminuye la producción a bajas velocidades de viento siendo más costoso moverlas y crea tensiones mayores que deben ser soportadas por las uniones, sin embargo no entraña riesgo de fallo si el sistema de orientación funciona correctamente de tal forma que coloque la cúpula de modo que el viento incida lateralmente en las aspas.

No existe una solución para este problema ya que no se contempla la posibilidad de reemplazar las palas debido al desembolso necesario y especialmente a que este inconveniente no supone ningún fallo en el funcionamiento. (La solución óptima sería de fibra de carbono reforzada con plástico, FVRP, como se hizo en el molino holandés Nolet visto con anterioridad en el estudio del estado del arte, pero de forma más económica se podría haber utilizado una estructura de aluminio o aleaciones de acero más ligeras, todo ello indudablemente más caro que la estructura actual.)

4.2.2. Ausencia de multiplicadora

El principal problema es que la multiplicadora necesaria para acoplar el movimiento del eje no se tiene. Precisamente por ello se han estudiado en un proyecto paralelo las propiedades del generador y el par aportado por el viento y con eso se puede elegir la multiplicadora adecuada que consiga la máxima producción a partir del movimiento el eje de giro.

4.2.3. Ubicación de multiplicadora y alternador

Como se pudo ver previamente ambos elementos se colocaban en la plataforma contigua a la unión entre el eje de giro de las aspas y el eje central.

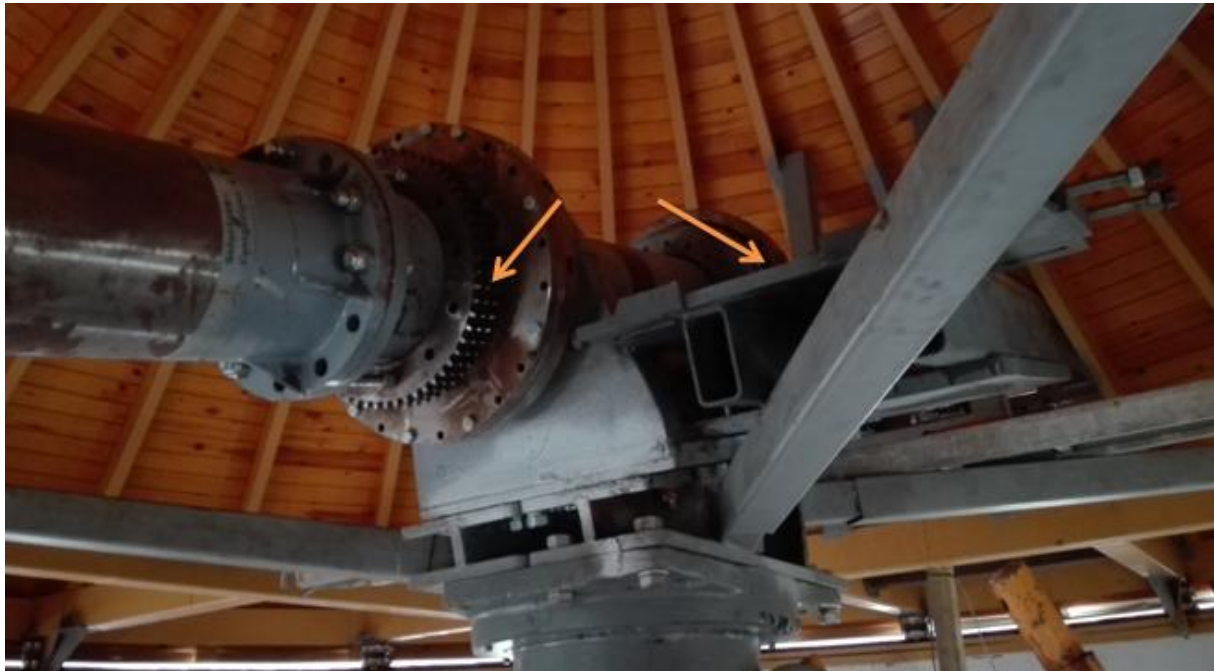


Figura 26. Ubicación alternador y multiplicadora

La situación lateral de estos elementos genera un momento torsor añadido en la estructura pudiendo contribuir a desalinear el eje, generar más pérdidas por rozamiento y aumentar las tensiones en algunos elementos. En el análisis del alternador se pudo apreciar que sus dimensiones y su peso no son en absoluto despreciables, y a esto habría que añadirle el peso y el volumen de la multiplicadora, creando la necesidad de una plataforma fuerte y de un tamaño considerable.

Por esta razón se ha buscado una ubicación alternativa donde poder colocar la estructura que soporte el alternador y la multiplicadora sin generar momentos de este tipo y que no afecte al movimiento de orientación de la estructura de la cúpula.

4.2.4. Raíl en U

Todo el conjunto de la estructura fue realizado por herrería en Toledo de forma manual, los perfiles y la chapa venían de fábrica pero los cortes, curvaturas y soldaduras se llevaron a cabo por trabajadores de este lugar, ya fuese en el emplazamiento del molino o en otro lugar de montaje para trasladarlo posteriormente. La perfección en las superficies de las piezas así como la curvatura perfecta es por tanto imposible de conseguir y ha resultado un tema vital para el funcionamiento, en absoluto despreciable.

El perfil en U utilizado como raíl para los apoyos de la cúpula que se encuentra en la parte superior de la estructura fija y presenta irregularidades en la superficie de contacto de los apoyos, la cual no se mantiene en un mismo plano, en su circunferencialidad y su concentricidad. Mientras que las irregularidades superficiales no son problemáticas el resto de imperfecciones sí que lo son.



Figura 27. Raíl en U

El hecho de que la superficie superior no se mantenga en un mismo plano genera que no puedan estar todos los apoyos en contacto, lo que produce un aumento de carga en aquellos que sí los están, este problema se genera también por la cantidad de apoyos existentes, problema que se analiza más adelante. El aumento de carga produce que los cálculos realizados con todos los apoyos pierdan validez y esto conlleva el fallo de estos rodamientos, situación que se ha producido con los rodamientos iniciales y con los actuales.

Por otro lado la imposibilidad de conseguir un círculo perfecto y posiblemente de una falta en la concentricidad con el eje soporte central llevó a colocar unos topes con la idea inicial de conseguir que los apoyos fuesen siempre por el raíl en U. Como se puede ver en la imagen estos topes chocan con el raíl de forma irregular creando más esfuerzos y desgaste desigual.



Figura 28. Tope

Debido a la dureza superior de la rueda del elemento que hace de tope respecto del raíl en U se aprecia con facilidad la gran penetración en el material.

Ya que la concentricidad es difícilmente corregible sin cambiar la pieza y los topes no solo no cumplen su función si no que desgastan el elemento la solución debe consistir en hallar un apoyo que mantenga el contacto con el perfil en U a pesar de las desviaciones aprovechando el ancho del perfil pudiendo así retirar los topes.

4.2.5. Apoyos entre la cúpula móvil y la estructura fija del molino

En el diseño inicial se ideó que la cúpula apoyase sobre la estructura fija a través de 11 rodamientos. La idea era distribuir la máximo posible el peso de forma que sufriesen lo mínimo tanto los rodamientos como las uniones de la cúpula, por lo que se eligieron unos apoyos diseñados para soportar cargas según esa distribución. En un diseño ideal funciona a la perfección porque todos los puntos de apoyo se sitúan en un solo plano y como ya se ha mencionado la construcción de este molino dista de ser ideal. Con las irregularidades superficiales y deformaciones de las piezas es imposible que los 11 rodamientos apoyasen, lo normal es que únicamente estuviesen en contacto 3, 4 ó 5 en mayor o menor medida ya que para definir un plano únicamente se necesitan 3 puntos.

Teniendo esto en cuenta la carga real soportada por cada rodamiento es por lo menos el doble de la calculada.

El fallo de estos apoyos es el principal problema por el que se recurrió a la universidad para que ayudase a solucionarlo. Los fallos constantes provocan la inmovilización de la cúpula, imposibilitando la orientación de cara al viento de las aspas limitando la obtención de la energía a una sola dirección.

Dentro de este obstáculo se ha determinado que las elecciones de los apoyos previos también fueron erróneas:

- Utilización de roldanas con holgura:

En un primer caso se utilizó un modelo de roldanas de SKF similar al de la figura montadas con cierta holgura para que pudiesen realizar la variación del ángulo de la trayectoria para adecuarse al recorrido circular. Sin embargo el resultado obtenido no fue en absoluto el esperado. Al dotar de holgura al montaje las roldanas comenzaban a abrirse siguiendo una trayectoria recta hasta una posición límite, en ese momento la estructura no permitía que la roldana se alejase más de su trayectoria circular y en un movimiento muy brusco y produciendo un sonido ensordecedor la roldana giraba y se recolocaba para repetir el proceso. Esto ocurría con los 11 apoyos y se generaba un entorno totalmente inhabitable en la cámara superior del molino donde se encuentran todos los elementos.

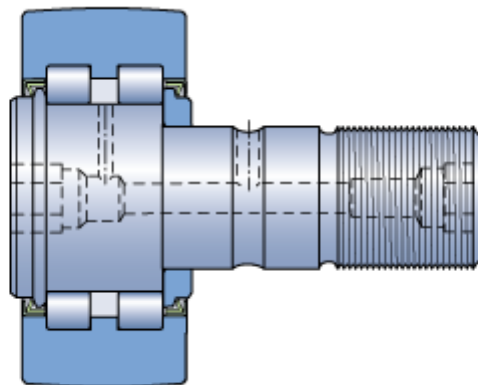


Figura 29. Roldana inicial

- Transfer balls:

Para solucionar el problema de los cambios bruscos de dirección se sustituyeron las roldanas por rodamientos de bolas de transferencia, modelo Ball transfer Heavy duty 820-76, que soportan una carga máxima de 3000 kg. Teniendo en cuenta que el conjunto que deben soportar los apoyos pesa unos 8000 kg las cuentas cuadran perfectamente si hay numerosos apoyos en contacto, en el momento en que hay únicamente 3 o 4 la carga crece disminuyendo rápidamente el tiempo de vida del rodamiento.

Cabe mencionar que estos rodamientos están diseñados para mantenerse fijos y que la carga deslice sobre ellos, sin embargo esto no tiene por qué generar ningún esfuerzo adicional ya que el movimiento relativo sería el mismo.

Con este sistema el inconveniente del cambio brusco se soluciona pero persiste el de la rotura prematura debido al número de apoyos y la irregularidad de los elementos.



Figura 30. Rodamiento de bolas de transferencia

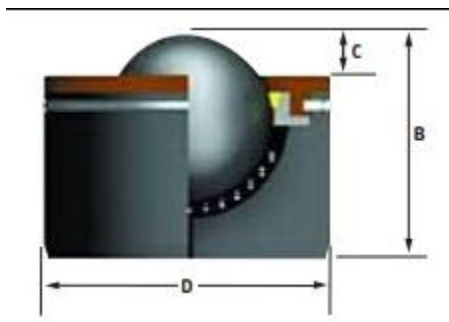


Figura 31. Rodamiento de bolas de transferencia

4.2.6. Eje irregular

El último problema surge del eje de giro de las palas. Producto de un mecanizado imperfecto y de deformaciones producidas por esfuerzos el eje no es completamente recto. Esto genera vibraciones y tensiones adicionales en los apoyos además de los consecuentes ruidos de rozamientos a más presión de la indicada. También a la hora de la transmisión supone un problema en las cadenas aunque este es despreciable frente a los anteriores.

La conclusión sin embargo es que esto seguirá ocurriendo debido a la dificultad y coste de cambiar o arreglar el eje.



Figura 32. Eje

5. Cálculo de la estructura

Uno de los principales objetivos de este proyecto es realizar un estudio detallado de la estructura para determinar los esfuerzos máximos en las vigas y las reacciones en los apoyos. De esta manera se obtiene la capacidad de predecir donde podría ocurrir un fallo y poder tomar las decisiones necesarias y seleccionar los elementos adecuados para evitarlos.

A pesar de las acciones dinámicas que forman una parte intrínseca del funcionamiento de un molino el estudio únicamente considera la acción del viento sobre la cubierta cónica. Se ha decidido excluir los esfuerzos generados por las aspas en el momento en el que absorben la energía cinética del viento y se encuentran en régimen de giro nominal. Este movimiento se transmite al eje que sí se encuentra en contacto con la estructura que se estudia. El principal motivo de esta decisión es el hecho de que el eje no se puede cambiar por motivos económicos y es el elemento sobre el que más esfuerzos dinámicos recaen. Al no poder alterar este elemento se ha asegurado que no altera los resultados de forma notable.

Este los transmite a la multiplicadora, elemento sobre el que tampoco se tiene capacidad de modificación, únicamente se selecciona un modelo, elección basada en los cálculos aerodinámicos de las palas y eléctricos del generador. Y a pesar de que el eje se apoya

sobre la estructura el giro lo absorben los rodamientos de goma cuya transmisión de esfuerzos dinámicos a la estructura es despreciable, su función más importante en este análisis es la de la transmisión del peso del eje y las palas. Existe otro apoyo mayor en el centro de la edificación pero el reparto de peso entre estos apoyos no permite despreciar el que atañe a la estructura calculada. Siguiendo los resultados presentados por la otra parte del proyecto, la encargada del análisis dinámico, la parte soportada por el apoyo central es menor que la que recae sobre los situados en nuestra estructura.

Por tanto queda demostrado que los esfuerzos dinámicos provocado por el giro de las aspas y por tanto del eje no se transmiten al elemento que se va a calcular, la única acción dinámica que sí afecta a las vigas de este componente es la acción del viento ya calculada.

Una vez se ha establecido qué cargas son las que provocan la aparición de esfuerzos se puede proceder al cálculo. Estas fuerzas como ya se ha visto son el peso propio de la estructura y la acción del viento, cargas estática y dinámica respectivamente.

Para realizar este cálculo se ha acudido a programas de cálculo estructural informáticos, finalmente se ha decidido usar un programa en pruebas del Departamento de Ingeniería de Máquinas de la ETSII-UPM utilizado para otro proyecto.

Ante la necesidad de otra vía de cálculo que no utilizase elementos tridimensionales se acudió a un método basado en la simplificación del conjunto objeto de estudio a una estructura lineal. Dadas las propiedades de la estructura analizada se determinó que era completamente factible esta simplificación y no generaría errores de magnitud apreciable para averiguar las reacciones en los apoyos, principal objetivo de este cálculo.

El programa finalmente utilizado se trata, como ya se mencionó con anterioridad, de un programa en fase de prueba del Departamento de Ingeniería de Máquinas que opera a través de Matlab. Esta herramienta resuelve el sistema operando con la matriz de rigidez de la estructura. Sin embargo presenta ciertas limitaciones que han obligado a realizar cálculos adicionales. La principal es que este sistema de cálculo no permite aplicar fuerzas a lo largo de la viga como se explica a continuación por lo que hay que calcular las reacciones en los apoyos para conocer la acción equivalente.

5.1. Fundamento teórico: Cálculo matricial.

A continuación se presenta una breve explicación del método de la matriz de rigidez dada la necesidad de su comprensión para utilizar y entender mejor el programa.

Lo primero que se debe saber es que en el cálculo matricial la vigas se definen como elementos lineales definidas por un nodo inicial y otro final. Estas vigas poseen unas características propias como son el área o el módulo de Young que aunque no se simbolizan son datos necesarios para el cálculo. A la hora de hacer los cálculos se atiende siempre a los nodos, es sobre ellos sobre los que se realiza el cálculo, no sobre las vigas. Las vigas se incluyen al reflejar en el nodo correspondiente aquellas que llegan a él.

Mediante este método lo que se obtiene de forma directa son los desplazamientos de los nudos. Los esfuerzos a los que están sometidos las vigas y las reacciones en los apoyos necesitan cálculos posteriores que derivan de este primero. Por tanto fuerzas aplicadas en las vigas deben transformarse en acciones en los nudos. Esto generalmente implica descomponer el problema en dos, uno en el que se analiza la barra individualmente con las cargas en la viga obteniéndose reacciones en los apoyos, y el otro es el que utiliza el cálculo matricial en el que se ha sustituido la carga en la barra por las reacciones calculadas en el primer problema aplicadas en los nudos. Este caso se da en el presente proyecto en varias ocasiones.

Existen una serie de pasos y elementos esenciales para el cálculo matricial de una estructura.

- Numerar nudos y barras. Saber qué nudos y qué barras se están tratando en cada momento es esencial a la hora de evitar errores.
- Definir orientación de las barras. Para lo que es necesario el paso anterior y así poder determinar cuál es el nodo inicial y cuál el final.
- Determinar la matriz de rigidez de cada barra. Esto incluye la matriz de rigidez en coordenadas locales y la matriz de giro para obtener la matriz en coordenadas globales.
- Determinar el vector de cargas. Expresado siempre en coordenadas globales y como ya se ha comentado siempre referido a los nudos.

Una vez se tiene lo anterior se procedería a la resolución del sistema obteniendo como resultado los giros y desplazamientos de los nudos.

El cálculo matricial se basa en la siguiente ecuación:

$$\underline{F} = \underline{K} \cdot \underline{u}$$

Donde \underline{F} es el vector de cargas aplicadas sobre los nudos en coordenadas globales,

\underline{K} es la matriz global de rigidez

y \underline{u} es el vector de desplazamientos referidos a los nudos, y la incógnita a resolver.

Por tanto si se conocen las fuerzas aplicadas en la estructura la dificultad reside en determinar correctamente la matriz de rigidez. Para ilustrarlo de forma más sencilla se utiliza un ejemplo.

Teniendo la estructura siguiente y una vez se han numerado nodos y barras y se ha definido la orientación de estas últimas se debe crear la matriz de rigidez global.

Para este propósito se debe analizar barra por barra y determinar la matriz de rigidez elemental de cada una. Una vez se tienen las matrices de rigidez elementales de todas las barras en coordenadas globales se ensamblan para formar la matriz global según se muestra más adelante.

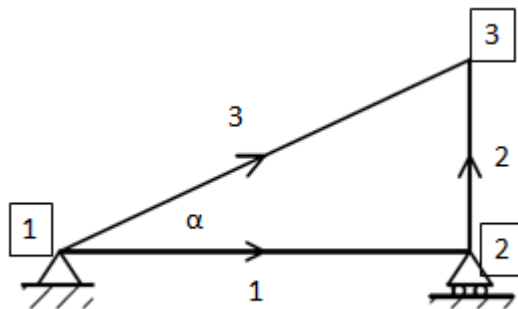


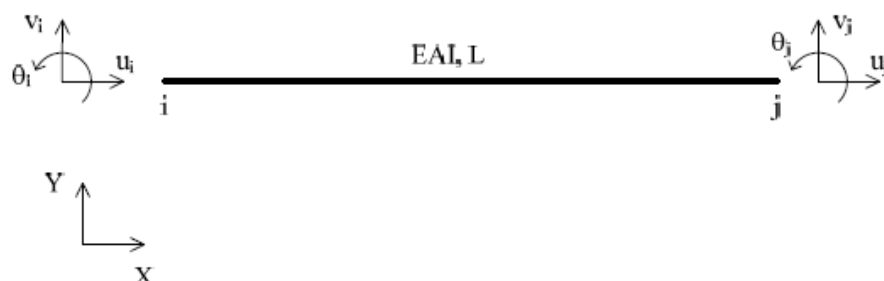
Figura 33. Estructura numerada

A la hora de definir la matriz de rigidez elemental de una barra se debe determinar qué tipo de barra es, lo que significa determinar los grados de libertad en sus extremos. En este caso todos los nudos son nudos rígidos por lo que al aislar las barras se comportarán como biempotradas. Se ha elegido este caso porque sucede lo mismo con las vigas de la estructura analizada en este trabajo.

Según el tipo de viga que se trate existen tablas de cálculo en el que se especifica cuál es la matriz de rigidez elemental perteneciente a cada barra según sean sus nudos rígidos o articulados. A continuación se presenta el caso de nudos rígidos extraído de documentación aportada por la ETSII.

Matrices de rigidez estructuras de nudos rígidos

1. Matriz de rigidez de viga horizontal (ejes locales):



$$\underline{K} = \begin{bmatrix} \frac{EA}{L} & 0 & 0 & -\frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} & 0 & -\frac{12EI}{L^3} & \frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} \\ \hline -\frac{EA}{L} & 0 & 0 & \frac{EA}{L} & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} & 0 & \frac{12EI}{L^3} & -\frac{6EI}{L^2} \\ 0 & \frac{6EI}{L^2} & \frac{2EI}{L} & 0 & -\frac{6EI}{L^2} & \frac{4EI}{L} \end{bmatrix}$$

Figura 34. Tablas de cálculo de estructuras. Fuente ETSII.

Las submatrices 3x3 están diferenciadas para ayudar a visualizar que la situada en la posición 1,1 se refiere al nodo inicial, la 2,2 al nodo final y tanto 1,2 como 2,1 por ser simétrica, a la relación entre ambos. Dentro de estas submatrices la primera fila se refiere al desplazamiento horizontal del nudo correspondiente, la segunda al desplazamiento vertical y la tercera al giro. Del mismo modo actúan las columnas, quedando por tanto en la diagonal las relaciones directas entre una carga aplicada en el sentido del desplazamiento y el propio desplazamiento, y fuera de la diagonal la relación entre fuerzas aplicadas en sentidos distintos al desplazamiento.

Este modelo sirve para todas las barras con nudos rígidos porque se da en coordenadas locales, en caso de que no coincidiesen los ejes locales de la barra con los globales de la estructura, como es el caso de las barras 2 y 3 en el ejemplo mostrado, se necesita de una matriz de giro.

$$\underline{\underline{L}}^e = \begin{bmatrix} \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \cos(\alpha) & -\sin(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sin(\alpha) & \cos(\alpha) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Multiplicando la matriz elemental en coordenadas locales por la matriz de giro y la traspuesta de esta última se obtiene la matriz elemental en coordenadas globales

$$\underline{\underline{K}}^e = \underline{\underline{L}}^e \cdot \underline{\underline{k}}^e \cdot \underline{\underline{L}}^{eT}$$

Para el ejemplo propuesto $\alpha = 90^\circ$ para la barra 2 y $\alpha = 30^\circ$ para la barra 3.

Cuando ya se tienen las matrices elementales en coordenadas globales se pasa al proceso de ensamblaje de la matriz global. Si el sistema tiene tres nudos la matriz global será de la forma 3x3 submatrices, siendo estas las que forman las matrices elementales. Para el ejemplo propuesto queda de la forma:

$$\underline{\underline{K}} = \begin{bmatrix} K_{ii}^1 + K_{ii}^3 & K_{ij}^1 & K_{ij}^3 \\ K_{ij}^1 & K_{jj}^1 + K_{jj}^2 & K_{ij}^2 \\ K_{ij}^3 & K_{ij}^2 & K_{jj}^2 + K_{jj}^3 \end{bmatrix}$$

Donde el subíndice i se refiere al nudo inicial de la barra y el j al nudo final. Si no hubiese barras entre dos nudos simplemente se pondría un 0.

Así es como se determina la matriz global de un sistema.

Conocida la matriz de rigidez y el vector de cargas solo queda despejar la ecuación y obtener el vector de desplazamientos.

$$\underline{\underline{K}}^{-1} \cdot \underline{\underline{F}} = \underline{\underline{u}}$$

Una vez se conocen los desplazamientos se calculan barra por barra los esfuerzos soportados por cada una con la misma ecuación solo que en esta ocasión utilizando los vectores y matrices correspondientes únicamente a la barra en coordenadas locales.

$$\underline{\underline{F}}^e = \underline{\underline{k}}^e \cdot \underline{\underline{u}}^e$$

En el caso en que se hubiese tenido que descomponer el problema se deben superponer los esfuerzos sufridos según el cálculo matricial y la barra aislada para dar como resultado las tensiones reales.

Cuando se conocen los esfuerzos en las barras se obtienen las reacciones en los apoyos al calcular las tensiones transmitidas por las barras a los apoyos. El esfuerzo transmitido será de signo contrario al soportado por la viga.

Con todo esto se obtienen los valores necesarios para considerar el cálculo estructural finalizado.

5.2. Cálculos Previos

Antes de poder utilizar el programa se deben realizar una serie de cálculos. Estos corresponden a las cargas soportadas por la estructura, tanto para definirlas como para determinar la manera de introducirlas en el programa

5.2.1. Acción del viento

Como en toda estructura debe considerarse la acción ejercida por el viento y los esfuerzos que aparecen en ella por su causa. En el proyecto objeto de estudio se consideran únicamente las tensiones creadas en la cúpula ya que la energía absorbida por las palas se transmite a través del eje al generador y a la estructura central, la cual no tiene problemas en soportarla y no es sujeto de análisis. La carga adicional que pueda transmitirse a los apoyos de la estructura examinada se añaden simplemente al propio peso del eje soportado por estos siguiendo la indicaciones del proyecto en paralelo que estudia el aprovechamiento de energía eólica de este molino.

La normativa vigente que recoge el procedimiento y sistema de cálculo aparece en el Eurocódigo 1, corresponde a UNE-EN 1991-1-4, donde las revisiones realizadas en 2010 no afectan a los contenidos aquí utilizados. Dado que no existe en tal documento una cubierta cónica como la que aquí se estudia se ha realizado la aproximación a una cúpula. Para este caso la normativa ofrece unos coeficientes de presión que van variando a lo largo de la estructura, en la zona de barlovento la cubierta experimenta una zona de flexión de signo contrario a la que aparece en sotavento.

Como se menciona en la norma este Eurocódigo aplica a "obras de edificación de ingeniería civil con alturas inferiores a 200m" y su objeto es "predecir las acciones características debidas al viento en estructuras apoyadas sobre el suelo, así como en sus componentes y accesorios adicionales". Siendo la cubierta en cuestión uno de sus componentes.

Para obtener resultados útiles siguiendo las indicaciones de la norma no basta con conocer la velocidad media se debe calcular la velocidad de pico para poder determinar si la estructura soportará los esfuerzos que aparezcan en situaciones más solicitadas. Saber que aguanta para un valor medio no es suficiente, el viento presentará oscilaciones que tienen que ser soportadas, es necesario que no aparezcan fallos cuando se llegue a situaciones de cargas mayores. Por ello mismo se deben calcular las presiones a altas velocidades del viento.

Para obtener esta velocidad se ha seguido el procedimiento indicado a través de fórmulas que figuran en la norma. En primer lugar es necesario calcular la velocidad básica v_b definida como la velocidad característica del viento a 10 metros del suelo en un terreno de categoría II. Al ser de la misma categoría que el terreno sobre el que está edificado el molino la fórmula para calcularla es la misma que la utilizada para la velocidad media pero sustituyendo 8,5 metros de la altura del molino por 10.

$$v_b = 3,19$$

Esta velocidad se necesita para calcular la desviación típica de la turbulencia

$$\sigma_v = k_r \cdot v_b$$

Donde k_r representa el factor del terreno que depende de la rugosidad del mismo.

$$k_r = 0,19 \cdot \left(\frac{z_0}{z_{0,II}} \right)^{0,07}$$

Al ser el terreno estudiado de la misma categoría que la referencia $k_r = 0,19$.

Con $\sigma_v = 0,606$ y la velocidad media ya se puede calcular la intensidad de la turbulencia a una altura z determinada:

$$I_v(z) = \frac{\sigma_v}{v_m(z)} = 0,196$$

Con todo lo anterior calculamos la presión correspondiente a la velocidad de pico que es el valor necesario para conocer las fuerzas que actuarán sobre la cubierta:

$$q_p(z) = [1 + 7 \cdot I_v(z)] \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot v_m^2(z) = c_e \cdot q_b(z)$$

Siendo ρ la densidad del aire cuyo valor recomendado es $1,25 \text{ kg/m}^3$

c_e es el factor de exposición

q_b es la presión correspondiente a la velocidad media

$$q_p(z) = 2,373 \cdot 5,968 = 14,16 \text{ Pa}$$

Esta presión correspondiente a la velocidad de pico es totalmente independiente de la forma de la estructura o cubierta, este valor es necesario para llegar al objetivo de este cálculo pero no es específico de la estructura objeto de estudio, es un paso obligatorio previo al cálculo de cualquier estructura.

Para definir el efecto concreto de esta presión sobre los componentes de una edificación se utiliza el coeficiente de presión externa c_{pe} . Este coeficiente va variando a lo largo de la estructura incrementando o disminuyendo los esfuerzos creados por esta presión q_p y obteniendo valores positivos o negativos según la forma del elemento. El valor de este coeficiente viene expresado en el Eurocódigo 1 donde se presentan diferentes cubiertas y se dan los valores del coeficiente de presión externa para cada caso.

Como ya se comentó previamente el caso que se ha escogido para aproximar la cubierta del molino es el de una cúpula. Para ello se indican en la norma los valores del coeficiente en tres puntos, el primero en recibir el viento en barlovento, el punto medio que coincide con la altura máxima de la cúpula y el extremo final en sotavento. Los planos perpendiculares a la dirección del viento presentan un c_{pe} constante para cada uno de ellos donde los valores de los planos intermedios deben obtenerse mediante interpolación lineal.

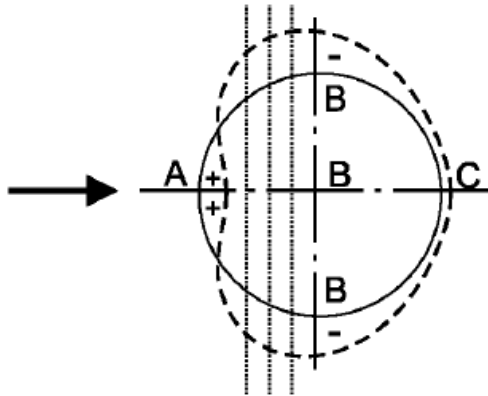


Figura 35. Puntos de la cúpula con c_{pe} conocido.

Los valores de este coeficiente dependen de la relación entre la altura de la estructura y el diámetro de la cúpula y la relación entre la altura de la cúpula y su diámetro según la siguiente gráfica

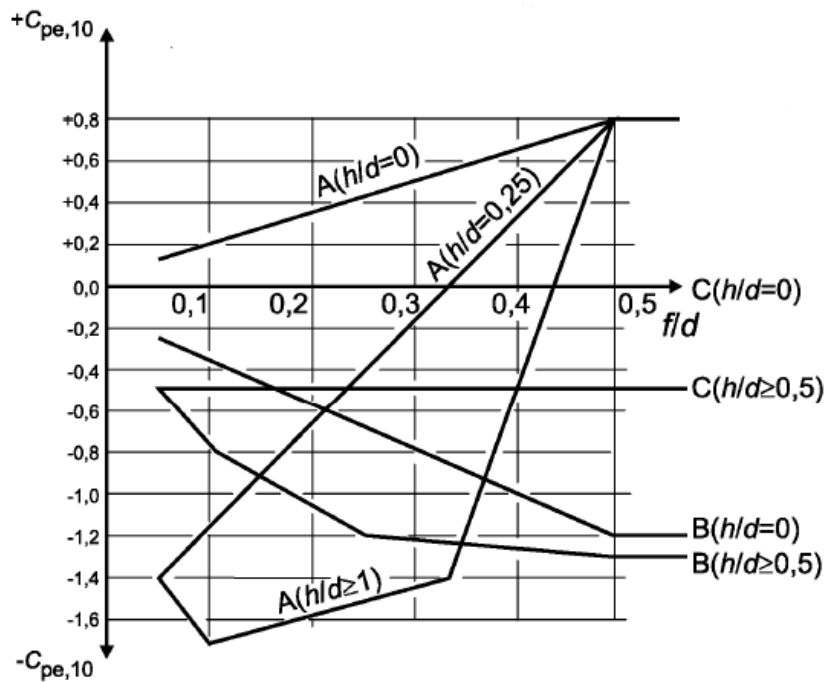


Figura 36. Gráfica de valores recomendados de los coeficientes de presión externa para cúpulas

Donde h es la altura de la edificación y f la de la cúpula. Dado que las vigas presentan un ángulo de 45° :

$$f = 2R \Rightarrow \frac{f}{D} = 0,5$$

Y para este valor queda definido el coeficiente de presión externa en los tres planos:

$$c_{pe,A} = 0,8 ; c_{pe,B} = -1,3 ; c_{pe,C} = -0,5$$

Esta distribución implica que las vigas que componen esta cubierta tendrán una distribución variable de carga actuando sobre ellas. Sabiendo que los planos paralelos poseen un coeficiente de presión externa constante la forma de calcular la distribución de la carga sobre la viga es la siguiente:

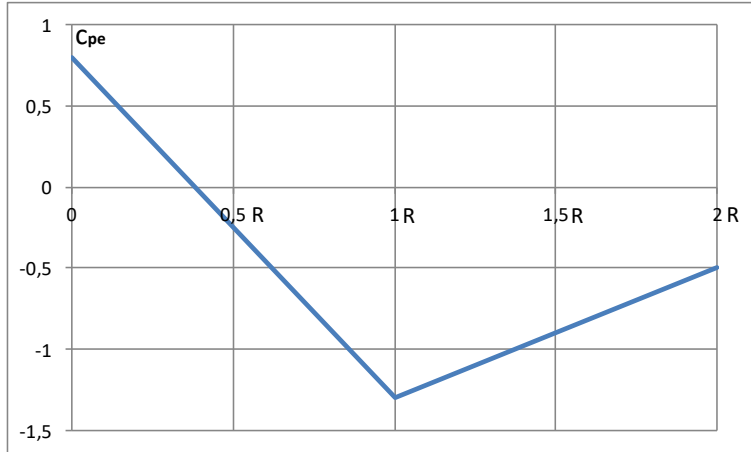


Figura 37. Distribución del coeficiente de presión externa en la cúpula

Por tanto escrito matemáticamente queda:

$$c_{pe} = -\frac{2,1}{R} \cdot x + 0,8 \quad \text{para } 0 \leq x \leq R ;$$

$$c_{pe} = \frac{0,8}{R} \cdot x - 2,1 \quad \text{para } R \leq x \leq 2R ;$$

Siendo x:

$$x = R \cdot (1 - \cos(\alpha));$$

Donde α es el ángulo que forma cada viga con la dirección del viento.

$$c_{pe} = cte$$

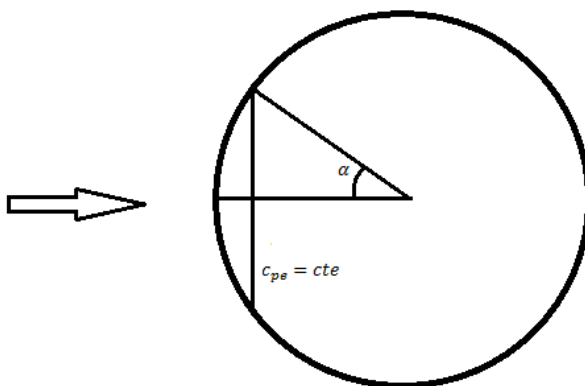


Figura 38. Esquema determinación valor de la x

De esta forma las vigas experimentan una carga variable a lo largo de su longitud.

La evolución de la carga a lo largo de las vigas de la cubierta se corresponde con la de una cúpula, sin embargo para tener en cuenta que las vigas en este caso de trabajo son rectas y no curvas se acudió al apartado de la cubierta a cuatro aguas para evaluar las diferencias. En este escenario los valores del coeficiente de presión presentan una distribución particular por secciones, no se trata de una evolución continua como pasaba en la cúpula. Para el caso que atañe a este proyecto estas regiones que presentan diferentes valores del coeficiente de presión al reubicarlas en una cubierta de planta circular como la que ocupa este trabajo pueden formar sectores circulares de esta con valores discretos colocados de tal forma que se asemejan a la evolución continua que estaba presente en la cúpula pero manteniéndose constante a lo largo de toda la viga.

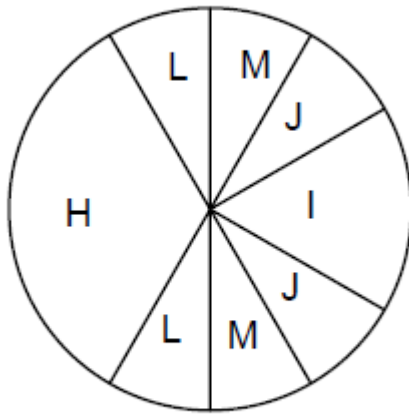


Figura 39. Distribución estimada de presiones según modelo de cuatro aguas

$$c_{pe}(H) = -0,8$$

$$c_{pe}(L) = -1,3$$

$$c_{pe}(M) = -0,8$$

$$c_{pe}(J) = -0,6$$

$$c_{pe}(I) = -0,3$$

Por todo lo anterior se ha decidido que la solución más idónea para esta situación es mantener la distribución inicial de presiones de la cúpula pero manteniendo el valor constante a lo largo de la viga. El resultado es una carga diferente para cada viga siguiendo la evolución de la cúpula pero siendo constante a lo largo de cada barra aproximándose más fielmente al comportamiento de vigas rectas que muestra el modelo a cuatro aguas.

Una vez se ha determinado que se establece una presión constante en la superficie de cubierta soportada por cada viga se plantea otro problema. El hecho de que la presión sea constante sobre cada sección de cubierta no quiere decir que la carga sobre cada viga lo sea ya que la superficie correspondiente a cada viga es un sector cónico, tiene forma triangular. Esto implica que a medida que se avanza por la viga el ancho de la superficie disminuye, ocurriendo lo mismo con la fuerza.

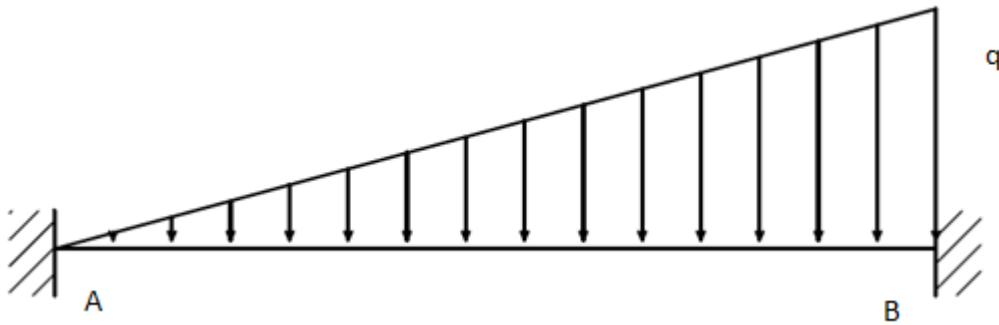


Figura 40. Distribución de carga en viga de cubierta

La figura anterior muestra como quedaría la carga en una viga de la cubierta por causa de la acción del viento (la carga es perpendicular porque se calcula usando presiones). Los extremos se visualizan empotrados porque en la estructura real se trata de nudos rígidos donde se transmiten todos los esfuerzos.

q simboliza el máximo valor de la carga variable, coincidente en el extremo B.

Sin embargo introducir esta carga variable actuando a lo largo de toda la viga en el programa de cálculo no es posible. La solución consiste en dividir el sistema en las dos estructuras siguientes donde el cálculo en una barra aislada es sencillo y de ahí se pueden obtener las cargas que actuarán en los nudos para proceder con el cálculo matricial. De esta manera el programa no estaría teniendo en cuenta los esfuerzos en las vigas de la cubierta provocados por el viento pero dado que el objetivo principal no es obtener los esfuerzos en cada barra si no las reacciones en los apoyos con las cargas creadas en los extremos es suficiente.

Para el caso que se trata en este apartado existe un formulario ofrecido por la ETSII con diferentes casos de barras y cargas en el que figura una equivalente:

VIGA EMPOTRADA DISTINTAS HIPOTESIS DE CARGA

F, q y segmentos, en valor absoluto.

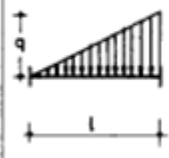
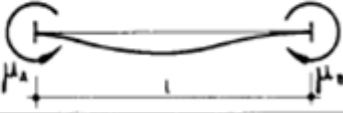
SOLICITACION	MOMENTOS DE EMPOTRAMIENTO PERFECTO	REACCIONES EN LOS APOYOS	DIAGRAMA DE MOMENTOS FLECTORES
	$M_A = \frac{q l^2}{30}$ $M_B = -\frac{q l^2}{20}$	$R_A = \frac{3}{20} q l$ $R_B = \frac{7}{20} q l$	

Figura 41. Formulario viga biempotrada carga variable

En este caso el punto A sería el final de la viga, el vértice del cono, y el punto B el extremo inferior.

Las reacciones obtenidas son

$$R_A = \frac{3}{20} \cdot q \cdot L$$

$$R_B = \frac{7}{20} \cdot q \cdot L$$

$$M_A = \frac{q \cdot L^2}{30}$$

$$M_B = \frac{q \cdot L^2}{20}$$

Donde q coincidiría con el valor de la acción del viento en el extremo inferior según la viga que se esté tratando ya que se ha utilizado la distribución de la cúpula en el plano base.

5.2.2. Cálculo de la reacción en los apoyos del eje

En general todos los elementos 3D involucrados se pueden simplificar en un elemento lineal, únicamente el eje de las aspas no puede incluirse en la estructura. Para poder realizar el cálculo equivalente se debe sustituir este eje por la carga que supone su peso en los dos puntos de apoyo reales de la estructura. Para el resto de vigas lo único que es necesario es diferenciarlas según su perfil y características definiendo sus propiedades

tales como el módulo de Young, sus momentos de inercia según los ejes horizontal y vertical locales de su sección, X y Z respectivamente, su módulo de torsión y su área.

Para determinar cuánta carga recae en los apoyos del eje también se han hecho unas simplificaciones para facilitar su cálculo.

- La primera de ellas consiste en transformarlo en un sistema bidimensional, con el eje funcionando como un viga lineal biapoyada.
- La segunda deriva de la primera y supone que los dos apoyos sobre los que se apoyaba el eje en la estructura estudiada coinciden en un mismo punto, consecuencia directa de haber situado el conjunto en un solo plano. La reacción obtenida se debe repartir entre los dos apoyos.
- La tercera consiste en suponer el apoyo sobre el eje central del molino como un apoyo puntual, obviando la longitud que existe entre los dos puntos en los que consiste este apoyo, que es reducida en comparación con el resto del eje y al estar situada entre estos dos puntos no genera un momento apreciable. Este apoyo no permite el desplazamiento lateral a diferencia del que interesa en este proyecto.
- Las aspas se sustituyen por una carga en el extremo del eje equivalente al peso de estas.

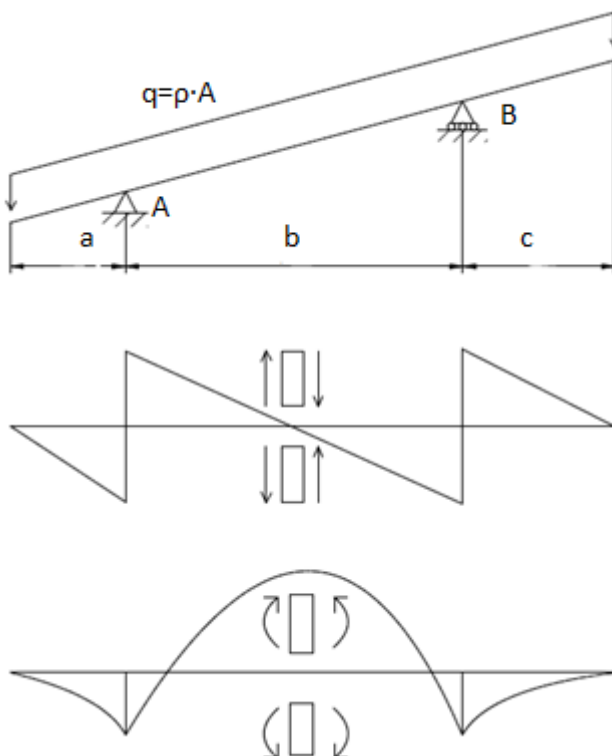


Figura 42. Esfuerzos sobre el eje

Las ecuaciones para resolver este sistema son las siguientes:

Sumatorio de fuerzas nulo

$$\rho \cdot A \cdot L = R_1 + R_2$$

Donde ρ es la densidad del material del eje, en este caso aluminio,

R_1 la reacción vertical en el apoyo central y R_2 la del apoyo de interés más cercano a las aspas.

Sumatorio de momentos nulo usando como punto de equilibrio el apoyo central

$$\frac{a}{2} \cdot \rho \cdot \frac{A \cdot a}{\cos 15} + R_2 \cdot b = \frac{b}{2} \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot b}{\cos 15} + \left(b + \frac{c}{2}\right) \cdot \frac{\rho \cdot A \cdot c}{\cos 15} + P \cdot (b + c)$$

Para hallar la reacción buscada sirve únicamente con resolver la de igualdad de momentos.

$$a = 2130 \text{ mm}; b = 2150 \text{ mm}; c = 1370 \text{ mm};$$

$$A = \pi \cdot (D^2 - d^2) = 2400\pi;$$

$P = 3000 \text{ N}$; correspondiente al peso de las aspas en el extremo de eje

$$R_2 = \frac{1}{b} \cdot \left[\frac{\rho \cdot A}{2 \cdot \cos 15} \cdot \left(\frac{b^2}{2} + \frac{c^2}{2} + b \cdot c \right) + P \cdot (b + c) \right]$$

$$R_2 = 984 \text{ N}$$

Una vez obtenida la tensión a soportar por los apoyos debido al eje ya se puede proceder al cálculo de la estructura final.

5.3. Metodología

Los pasos seguidos para el cálculo de estructuras mediante este útil se muestran a continuación y todos se han realizado utilizando el lenguaje de escritura de Matlab.

1. Localización de los nodos de la estructura.
2. Creación de las vigas situando un nodo como inicio y otro como final.
3. Determinación de las propiedades de las vigas.
4. Clasificación de los nodos, incluye la aplicación de fuerzas externas, desplazamiento conocido de los nodos y grados de libertad.
5. Modificación de la exposición de resultados del programa para que muestre los valores de interés para este proyecto.
6. Confirmación y modificación de la clasificación de los nodos.

7. Obtención de resultados

En los siguientes apartados se explica detenidamente cada etapa. Se presenta para cada una la parte correspondiente del programa escrita en Matlab específicamente para este proyecto, el programa entero con sus diferentes archivos se puede encontrar en el Anexo III.

5.3.1. Localización de los nodos de la Estructura

El primer paso necesario para realizar cualquier cálculo de estructuras consiste en definirla. El programa utilizado es capaz de traducir el dibujo de un archivo .igs a lenguaje Matlab para crear la estructura, sin embargo para este proyecto se ha preferido escribirlo directamente utilizando las herramientas necesarias y aprovechando las posibles simetrías de la estructura. Para definir los nodos de la estructura se utiliza el vector COOR el cual como se aclara en el archivo incluye las coordenadas de cada nodo, el tipo de cada nodo y según el tipo los grados de libertad conocidos o sobre los que se aplican fuerzas o momentos.

A la hora de escribir las coordenadas se han utilizado los datos recogidos, ya sean por los planos recibidos o por mediciones realizadas in-situ, y los cálculos geométricos y trigonométricos para determinar ángulos que posibiliten una definición a través de bucles. Los nudos del plano horizontal se han dividido en los cuatro sectores circulares y para cada nodo de un sector se utiliza un bucle para crear los homólogos en los otros sectores. Es decir si en cada sector hay 6 nodos se crean seis bucles distintos para que al definir cada uno de los seis nodos se pueda extender a los otros tres sectores. Los nodos particulares se generan individualmente si no hay simetrías.

```
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%===== DATA =====%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% COOR = [x y z NodeType Cx Cy Cz Cmx Cmy Cmz ] where
% ----- NodeType == 0 if the point is fixed -
% > Cx .. Cmz indicates the gdl fixed (0) or free (1)
% ----- NodeType == 1 if the point is a rigid node with forces applied -
% > Cx .. Cmz indicates the loads
% ----- NodeType == 2 if the point is a rigid node with displacement -
% > Cx .. Cmz indicates the displacements
% ----- Cx .. Cmz indicates the gdl fixed

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Crear la matriz de ceros COOR para rellenar después

COOR = zeros(59,10);

% Nodos exteriores de la estructura circular
% Radio y ángulos de los puntos
```

```
n=0;
R=6190/2;      %mm
alpha=0.3310738; %rad
beta=0.4231640167;
gamma=0.3933945;

for i=1:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2+beta-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2+beta-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=2:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2+beta/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2+beta/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=3:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=4:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=5:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=6:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=7:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=8:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta-gamma/2-n*pi/2);
```

```

    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta-gamma/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

% Nodos interiores de la estructura circular
% Distancias entre los diferentes puntos
disttotal=3437;
distcentral=1020;
dist=sqrt((disttotal/2)^2+(distcentral/2)^2);
phi=atan((distcentral/2)/(disttotal/2));

for i=33:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)*cos(pi/4-n*pi/2)/(sqrt(2)/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)*sin(pi/4-n*pi/2)/(sqrt(2)/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=34:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)/cos(phi)*cos(phi-n*pi/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)/cos(phi)*sin(phi-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=35:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)/cos(phi)*cos(-phi-n*pi/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)/cos(phi)*sin(-phi-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

% Nodos de la estructura de apoyo del eje
%En el plano base

COOR(45,1)=disttotal/2+650;
COOR(45,2)=distcentral/2;

COOR(46,1)=disttotal/2+650;
COOR(46,2)=-distcentral/2;

COOR(47,1)=disttotal/2+650;
COOR(47,2)=350/2;

COOR(48,1)=disttotal/2+650;
COOR(48,2)=-350/2;

COOR(49,1)=disttotal/2;
COOR(49,2)=550/2;

COOR(50,1)=disttotal/2;
COOR(50,2)=-550/2;

%En altura
%Alturas de las estructuras de apoyo del eje
alt1=600;
separacion=660;

```



```
alt2=400;
alt3=1050;

%Primera estructura

COOR(51,1)=disttotal/2+650;
COOR(51,2)=separacion/2;
COOR(51,3)=alt1;

COOR(52,1)=disttotal/2+650;
COOR(52,2)=350/2;
COOR(52,3)=alt1;

COOR(53,1)=disttotal/2+650;
COOR(53,2)=-350/2;
COOR(53,3)=alt1;

COOR(54,1)=disttotal/2+650;
COOR(54,2)=-separacion/2;
COOR(54,3)=alt1;

%Segunda estructura

COOR(55,1)=disttotal/2;
COOR(55,2)=550/2;
COOR(55,3)=alt3;

COOR(56,1)=disttotal/2;
COOR(56,2)=-550/2;
COOR(56,3)=alt3;

COOR(57,1)=disttotal/2;
COOR(57,2)=550/2;
COOR(57,3)=alt2;

COOR(58,1)=disttotal/2;
COOR(58,2)=-550/2;
COOR(58,3)=alt2;

%Nodo de la capirota
altmax=3180;

COOR(59,3)=altmax;
```

5.3.2. Creación de las vigas

Una vez se han establecido los nodos se procede a definir las vigas. Para este propósito se utiliza el vector BEAMS formado por el nodo inicial y final de cada viga, determinando la orientación, y las propiedades de esta.

En la medida de lo posible la numeración de las vigas guarda relación con los nodos simplificando así su definición. Las vigas correspondientes a la pletina exterior y al cuadrado interior se corresponden con sus nodos iniciales. Otras vigas interiores y las de la cubierta guardan una relación geométrica posibilitando la utilización de bucles. El resto se definen individualmente al igual que ocurría con los nodos.

```
%Creación de vigas
BEAMS = zeros(109,15);

%Vigas periféricas
for i=1:1:31
    BEAMS(i,1:2) = [...
        i i+1];          %De la 1 a la 31
end

BEAMS(32:34,1:2) = [...
    32 1    %32
    33 34   %33
    34 49]; %34

%Vigas interiores
for i=35:1:43
    BEAMS(i,1:2) = [...
        i i+1];          %De la 35 a la 43
end

BEAMS(44,1:2) = [...
    44 33];          %44

%Resto de vigas
BEAMS(45:77,1:2) = [...

    33 1    %45
    34 45   %46
    45 3    %47
    35 46   %48
    46 5    %49
    45 47   %50
    47 48   %51
    48 46   %52
    49 50   %53
    50 35   %54
    36 7    %55
    36 9    %56
    37 11   %57
    38 13   %58
    39 15   %59
    39 17   %60
    40 19   %61
    41 21   %62
    42 23   %63
    42 25   %64
    43 27   %65
    44 29   %66
    33 31   %67
    47 52   %68
    48 53   %69
    51 52   %70
```

```

52 53 %71
53 54 %72
49 57 %73
57 55 %74
50 58 %75
58 56 %76
57 58]; %77

%Vigas de la capirota
for i=1:1:32
BEAMS(77+i,1:2) = [...
i 59]; %De la 78 a la 109
end

```

5.3.3. Determinación de las propiedades de las vigas

Este paso es necesario a la hora de dibujar la elástica, determinar la rigidez de las vigas y archivar alguna propiedad para su posterior uso como por ejemplo la densidad en el cálculo del peso propio de la estructura.

Algunas vigas poseen perfiles normalizados para los que se ha acudido a las tablas y simplemente se han transcrito al programa en la unidades de trabajo apropiadas. Por el contrario existen algunas vigas cuyos perfiles no aparecen en dichas tablas por lo que sus características han sido calculadas aparte, estos son el del entramado del plano horizontal y la pletina exterior.

Estas propiedades son área (A), módulo de Young (E), módulo de inercia (I) de los ejes Y y Z, módulo de torsión (J), módulo de elasticidad transversal (G) y la densidad (ρ).

Para aquellos que no aparecen en tablas se pueden obtener conociendo las dimensiones y el material. Conociendo el material se sabe la densidad, el módulo de Young y a través de el coeficiente de Poisson, que para el caso del acero es 0,3, se obtiene el módulo de elasticidad transversal. Para el módulo de torsión, dado que se trata de un perfil de pared delgada y cerrada, se puede utilizar la fórmula de Bredt:

$$J = \frac{4 \cdot e \cdot A'^2}{\Gamma}$$

Donde A' corresponde al área encerrada por la línea media y Γ es la longitud de esta línea media, equivalente al perímetro de A' .

Para el caso de la pletina que forma la circunferencia externa se debe aplicar la fórmula de los perfiles de pared delgada abierta:

$$J = \frac{1}{3} \cdot e^3 \cdot \Gamma$$

Los módulos de inercia se calculan de manera similar para los dos ejes, únicamente es necesario cambiar la altura por la anchura del perfil. Para sección rectangular la fórmula derivada de este caso es la siguiente:

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot b \cdot h^3$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot h \cdot b^3$$

Donde h es la altura de dicho rectángulo y b su anchura o base. Dado que los perfiles con los que se trabaja en este proyecto son de sección hueca se resta al rectángulo exterior el interior:

$$I_y = \frac{1}{12} \cdot (b \cdot h^3 - (b - 2e) \cdot (h - 2e)^3)$$

$$I_z = \frac{1}{12} \cdot (h \cdot b^3 - (h - 2e) \cdot (b - 2e)^3)$$

Siendo e el espesor.

```
%PROPIEDADES
%Propiedades de las vigas del plano base (33-49;53-67)
% Propiedades de los perfiles %no aparece en tablas
b = 100; h = 150; espesor = 5; %mm
E = 210e3; %MPa
A = 2400; %mm^2
ro = 7833; % Kg/m^3
J = 7906276; % mm^4
Iy = (b*h^3-(b-2*espesor)*(h-2*espesor)^3)/12; %mm^4
Iz = (b^3*h-(b-2*espesor)^3*(h-2*espesor))/12; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(33:49,3:8) = ones(17,1)*[ E A J Iy Iz G];
BEAMS(53:67,3:8) = ones(15,1)*[ E A J Iy Iz G];
BEAMS(33:49,15) = ro;
BEAMS(53:67,15) = ro;

%Propiedades de los perfiles de la estructura de apoyo del eje
%(50-52;68,69; 73-76)
%%Aparece en tablas
b1 = 100; h1 = 100; esp1 = 5; %mm
E = 210e3; %MPa
A1 = 1810; %mm^2
ro1 = 7833; % Kg/m^3
J1 = 4400000; % mm^4
Iy1 = 2660000; %mm^4
Iz1 = 2660000; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(50:52,3:8) = ones(3,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
BEAMS(68:69,3:8) = ones(2,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
BEAMS(73:76,3:8) = ones(4,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
BEAMS(50:52,15) = ro1;
```

```

        BEAMS(68:69,15) = ro1;
        BEAMS(73:76,15) = ro1;

%Propiedades pletina circunferencia externa (1-32)
%no aparece en tablas
h2=150;b2=10;    %mm
E = 210e3;        %MPa
A2 = 1500;        %mm^2
ro2 = 7833;       % Kg/m^3 PREGUNTAR
J2 = 50000;       % mm^4
Iy2 = (b*h^3)/12; %mm^4
Iz2 = (b^3*h)/12; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(1:32,3:8) = ones(32,1)*[ E A2 J2 Iy2 Iz2 G];
BEAMS(1:32,15) = ro2;

%Propiedades vigas capirote (78-109)
%Aparece en tablas
b3 = 50; h3 = 100; esp3 = 3; %mm
E = 210e3;        %MPa
A3 = 833;         %mm^2
ro3 = 7833;       % Kg/m^3
J3 = 886000;      %mm^4
Iy3=1050000;      %mm^4
Iz3=356000;       %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(78:109,3:8) = ones(32,1)*[ E A3 J3 Iy3 Iz3 G];
BEAMS(78:109,15) = ro3;

%Propiedades viga 77
%Aparece en tablas
b4 = 80; h4 = 80; esp4 = 4; %mm
E = 210e3;        %MPa
A4 = 1160;        %mm^2
ro4 = 7833;       % Kg/m^3
J4 = 1800000;     %mm^4
Iy4=1088000;      %mm^4
Iz4=1088000;      %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(77,3:8) = [ E A4 J4 Iy4 Iz4 G];
BEAMS(77,15) = ro4;

%Propiedades vigas 70-72
%Aparece en tablas
b5 = 185; h5 = 30; esp5 = 5; %mm
E = 210e3;        %MPa
A5 = 1160;        %mm^2
ro5 = 7833;       % Kg/m^3
J5 = 1061780;     %mm^4
Iy5 = (b5*h5^3-(b5-2*esp5)*(h5-2*esp5)^3)/12; %mm^4
Iz5 = (b5^3*h5-(b5-2*esp5)^3*(h5-2*esp5))/12; %mm^4

```

```
G = E / (2 * (1 + 0.3)); %MPa
```

```
%Meterlas en la matriz
```

```
BEAMS(70:72,3:8) = ones(3,1) * [ E A5 J5 Iy5 Iz5 G];
```

```
BEAMS(70:72,15) = ro5;
```

5.3.4. Clasificación de los nodos y cargas sobre los mismos

Los nodos pueden ser de tres tipos, fijos, con carga o con desplazamiento conocido. Como ya se ha comentado en el primer apartado de la metodología esto se almacena en el array COOR. Los nodos fijos admiten la posibilidad de determinar qué grados de libertad están fijados y cuales libres. En los nodos con carga se debe introducir la carga aplicada en la posición correcta según indique fuerza en el eje X o momento según el eje Z por ejemplo. Por último para el caso de los nodos con desplazamiento conocido existe la posibilidad de introducir el giro o el desplazamiento que se conozca.

Para el caso que atañe a este proyecto se han considerado todos los nodos como nodos con carga aplicada ya que por lo menos deberán soportar el peso propio. Para los apoyos se realiza su distinción en la ventana interactiva que aparece una vez se ha corrido el programa. A la hora de escribir el archivo se imponen todos como nodos con carga.

```
%% FUERZAS SOBRE LOS NUDOS
```

```
%CARACTERÍSTICAS DE LOS NODOS
```

```
COOR(1:59,4) = 1; %En principio todos son nudos rígidos con F=0 aplicadas sobre ellos
```

A continuación se explicarán las diferentes cargas aplicadas, sin olvidar que para todas ellas se ha tenido que traducir las fuerzas de coordenadas locales de la viga a globales de la estructura para conseguir una respuesta acertada del programa.

Carga representativa del eje

Tras los cálculos previos realizados con anterioridad se conoce la carga del eje que corresponde a los apoyos de la estructura. Se ha distribuido entre los dos puntos que sustentan el eje y se ha descompuesto en las tres direcciones del espacio atendiendo a la inclinación del eje y de la viga que soporta los rodets y a los puntos en que estos hacen contacto, concretamente con 45° sobre la vertical.

```
% ACCIÓN DEL EJE SOBRE LOS APOYOS
```

```
Ft=5000; F=Ft/2; % (N) %Peso del eje soportado y dividido entre los dos nodos
```

```
%Reparto de F segun las direcciones de los ejes
```

```
COOR(52,4:10) = [1 F*sqrt((sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2) F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) -F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) 0 0 0];
```

```
COOR(53,4:10) = [1 F*sqrt((sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2) -F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) -F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) 0 0 0];
```

Peso propio de la estructura

Al igual que ocurriría con al calcular la acción del viento el peso de una viga equivale una carga aplicada en toda su longitud y al ser un programa con elementos finitos las fuerzas solo se pueden aplicar en los nodos. Por ello se ha recurrido al mismo procedimiento en el que se calculan las resultantes en los nodos donde en este caso la mitad del peso de cada viga se carga sobre el nodo inicial y la otra mitad sobre el final.

Para calcular el peso de cada viga se recurre al array BEAMS donde están almacenadas las características necesarias como el área y la densidad, y calculando la longitud a través de las coordenadas de los nodos se obtiene el peso.

```
% PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA
% Carga constante a lo largo de la viga
% Genera reacciones verticales y momentos por ser nudos rígidos
g=9.81; % m/s^2 % Gravedad
ang=0;
l=0;

for i=1:109
    % Ángulo que forma cada viga con el eje X
    if (COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1))==0 % Para que la
    tangente no de problemas con denominador nulo
        if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2))>0 % Para saber la
        dirección de la viga y determinar el ángulo
            ang=pi/2;
        else
            ang=3*pi/2;
        end
    else
        ang=atan((COOR(BEAMS(i,2),2)-
COOR(BEAMS(i,1),2))/(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)));
        % La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como
        % resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
        % según el caso digo a qué cuadrante pertenece
        % Segundo cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 &&
(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
            ang=ang+pi;
        else
            % Tercer cuadrante
            if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 &&
(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
                ang=ang+pi;
            end
        end
    end

    % Longitud de la viga
    l=sqrt((COOR(BEAMS(i,1),1)-
COOR(BEAMS(i,2),1))^2+(COOR(BEAMS(i,1),2)-
COOR(BEAMS(i,2),2))^2+(COOR(BEAMS(i,1),3)-COOR(BEAMS(i,2),3))^2);
    %Carga total correspondiente al peso
    qpeso=g*BEAMS(i,15)*BEAMS(i,4)*10^(-6); % N/m
```



```
% Fuerzas verticales en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),7) = COOR(BEAMS(i,1),7) - qpeso*1/2*10^(-3);
% Fuerzas verticales en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),7) = COOR(BEAMS(i,2),7) - qpeso*1/2*10^(-3);
% Momentos flectores en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),8) = COOR(BEAMS(i,1),8) - sin(ang)*qpeso*1^2*10^(-
6)/12; %
COOR(BEAMS(i,1),9) = COOR(BEAMS(i,1),9) + cos(ang)*qpeso*1^2*10^(-
6)/12; %
% Momentos flectores en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),8) = COOR(BEAMS(i,2),8) + sin(ang)*qpeso*1^2*10^(-
6)/12; %
COOR(BEAMS(i,2),9) = COOR(BEAMS(i,2),9) - cos(ang)*qpeso*1^2*10^(-
6)/12; %
end
```

Carga por el cerramiento

Al igual que por la acción del viento y el peso propio, la carga debida al peso del cerramiento se debe distribuir entre los dos nudos. En este caso no se trata de una distribución uniforme a lo largo de la viga como cuando se calculaba el peso de cada una, si no de una carga variable uniformemente por el hecho de que en la zona inferior existe más superficie soportada por las vigas que en el extremo más alto. Esto se debe a la forma cónica de la cubierta y afecta de igual manera que lo hacía la acción del viento.

El cálculo de la carga ha tenido en cuenta la composición del cerramiento que cubre la estructura y la variación de área que corresponde a cada viga según se asciende.

Los materiales que componen el cerramiento son rastreles de tabla de pino y chapa de Zinc en el exterior. Para calcular el peso se han tenido en cuenta sus densidades y espesores.

$$\rho_{pino} = 559 \frac{kg}{m^3}; e_{pino} = 2 \text{ cm}$$

$$\rho_{zn} = 6587 \text{ kg/m}^3; e_{zn} = 2 \text{ mm}$$

Para calcular la densidad equivalente del material conjunto se ha utilizado la ponderado según el material existente:

$$\rho_m = \frac{20 \text{ mm} \cdot 559 \frac{kg}{m^3} + 2 \text{ mm} \cdot \frac{6587 kg}{m^3}}{22 \text{ mm}} = 1107 \text{ kg/m}^3$$

Una vez se ha hallado la densidad que se va a utilizar se procede con la variación de la anchura a lo largo de la viga. La forma cónica de la cubierta al dividirla entre las 32 vigas que la soportan puede simplificarse en un triángulo isósceles de base $\frac{\pi \cdot D}{32}$ con lo que la evolución diferencial del volumen puede definirse como:

$$dV(x) = A(x) \cdot dx = e_t \cdot l(x) \cdot dx$$

$l(x)$ debe representar la evolución de la anchura del triángulo siendo $\frac{\pi \cdot D}{32}$ al comienzo y 0 al final, con lo que se define x como la variable que recorre la viga en sentido ascendente tomando como valor inicial 0 y valor final la longitud de la viga. Teniendo en cuenta el ángulo que las vigas de la cubierta forman con el plano horizontal y que según aumentase x debía disminuir $l(x)$:

$$l(x) = \frac{\pi}{32} \cdot (D - a \cdot x)$$

Para $x = L \Rightarrow D - a \cdot L = 0$

$$D - a \cdot L = 0$$

$$a = \frac{D}{L} = \frac{2 \cdot R}{\frac{R}{\cos(\theta)}} = 2 \cdot \cos(\theta)$$

Quedando finalmente

$$l(x) = \frac{\pi}{32} \cdot (D - a \cdot x) = \frac{\pi}{32} \cdot (D - 2 \cdot x \cdot \cos(\theta))$$

$$dV(x) = e_t \cdot \frac{\pi}{32} \cdot (D - 2x \cdot \cos(\theta)) \cdot dx$$

$$\frac{dV(x)}{dx} = e_t \cdot \frac{\pi}{32} \cdot (D - 2x \cdot \cos(\theta))$$

Esta sería la distribución de la carga, equivalente a una carga que varía linealmente aplicada a lo largo de toda la viga con ordenada en el origen nula. Sin embargo la viga está inclinada por lo que la carga no es aplicada perpendicularmente por lo que aún no se puede acudir a las tablas para conocer las reacciones en los apoyos.

Se trata de una viga con los extremos empotrados ya que ambos nodos son rígidos. Para realizar un cálculo más sencillo se ha colocado la barra de forma horizontal para utilizar los ejes locales de la viga, aplicándose la carga de forma inclinada. Se ha descompuesto la figura en dos problemas, uno con carga totalmente vertical y otro horizontal de modo que ahora sí se puede acudir a las tablas para la carga vertical.

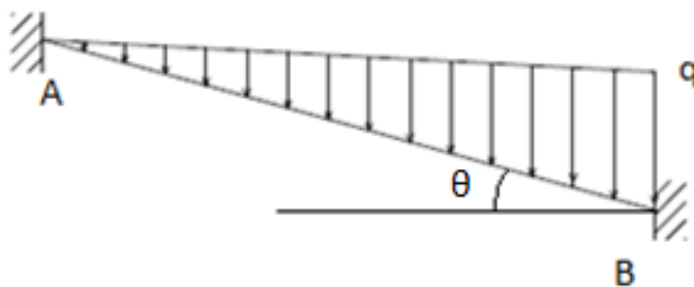


Figura 43. Carga sobre viga por cerramiento

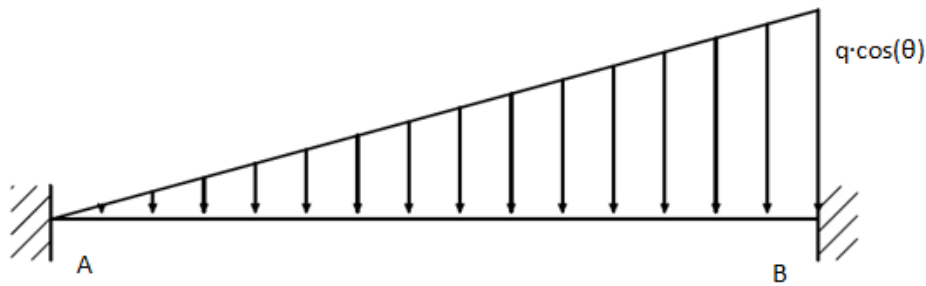


Figura 44. Carga descompuesta sobre viga por cerramiento

Se obtienen así los momentos en el empotramiento y las reacciones verticales en coordenadas locales. El problema con la carga horizontal no genera momentos, únicamente reacciones horizontales ante los esfuerzos de tracción y compresión. Pero dado que en el problema original, en coordenadas globales solo existe reacción vertical se puede establecer que la reacción vertical en coordenadas locales es una componente de esta reacción vertical en coordenadas globales, obligando a la reacción horizontal en coordenadas locales a ser la otra componente, siendo de la forma:

$$H_i = R_i \cdot \tan(\theta)$$

Acudiendo de nuevo a las tablas se obtiene que en los apoyos se obtienen las reacciones en coordenadas locales para la carga vertical de:

$$R_A = \frac{3}{20} \cdot q \cdot L \cdot \cos(\theta)$$

$$R_B = \frac{7}{20} \cdot q \cdot L \cdot \cos(\theta)$$

$$M_A = \frac{q \cdot L^2 \cdot \cos(\theta)}{30}$$

$$M_B = \frac{q \cdot L^2 \cdot \cos(\theta)}{20}$$

Siendo $q = \rho_m \cdot \frac{\pi \cdot D}{32} \cdot e_t$ (N/m)

Y refiriéndose el punto A al de máxima cota y el B al de mínima.

La reacción en coordenadas globales queda por tanto

$$V_i = R_i^2 + H_i^2 = R_i \cdot \sqrt{1 + \tan^2(\theta)}$$

% ACCIÓN ADICIONAL SOBRE LAS VIGAS DE LA CUBIERTA

% Como no puedo poner una carga a lo largo de la viga utilizo el
% equivalente sustituyendola por reacciones y momentos en los
extremos.

```

Lv=sqrt((COOR(4,1))^2+(COOR(59,3))^2)*10^(-3); % m % Longitud de las
vigas de la cúpula en metros para

% obtener las
fuerzas y momentos en N y Nm
theta= atan(COOR(59,3)/COOR(4,1)); % Ángulo de cubierta

% ACCIÓN POR PESO DEL CERRAMIENTO

% Carga rampa por la variación del área

g=9.81; % m/s^2 % Gravedad
ro6=1107; % kg/m^3 Densidad de la cubierta sobre la viga, formada por
madera de pino y chapa de Zn
et=22; % mm Espesor total de la cubierta
qcub=g*ro6*et*pi*2*R/32*10^(-6); % N/m % Carga en el extremo inferior de
la viga de cubierta por el cerramiento

for i=78:109 % Se sigue recorriendo por vigas para no cambiar de
criterio
    % Ángulo que forma cada viga con el eje X
    ang=atan(COOR(BEAMS(i,1),2)/(COOR(BEAMS(i,1),1)));
    % La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como
    % resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
    % según el caso digo a qué cuadrante pertenece
    % Segundo cuadrante
    if (COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) < 0
        ang=ang+pi;
    else
        % Tercer cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) < 0
            ang=ang+pi;
        end
    end

    % Fuerzas verticales en el nodo inicial
    COOR(BEAMS(i,1),7) = COOR(BEAMS(i,1),7) -
7*qcub*Lv/20*cos(theta)*sqrt(1+tan(theta)^2);
    % Fuerzas verticales en el nodo final
    COOR(BEAMS(i,2),7) = COOR(BEAMS(i,2),7) -
3*qcub*Lv/20*cos(theta)*sqrt(1+tan(theta)^2);
    % Momentos flectores en el nodo inicial
    COOR(BEAMS(i,1),8) = COOR(BEAMS(i,1),8) +
sin(ang)*qcub*Lv^2/20*cos(theta);
    COOR(BEAMS(i,1),9) = COOR(BEAMS(i,1),9) -
cos(ang)*qcub*Lv^2/20*cos(theta);
    % Momentos flectores en el nodo final
    COOR(BEAMS(i,2),8) = COOR(BEAMS(i,2),8) -
sin(ang)*qcub*Lv^2/30*cos(theta);
    COOR(BEAMS(i,2),9) = COOR(BEAMS(i,2),9) +
cos(ang)*qcub*Lv^2/30*cos(theta);
end

```

Acción del viento

El cálculo para este caso sigue una estructura similar a la utilizada en el peso del cerramiento pero con la diferencia que en este caso al ser una presión la que actúa sobre la cubierta la fuerza a tener en cuenta sí es perpendicular a la superficie y a la viga facilitando de algún modo los cálculos. Se puede recurrir a las tablas sin descomponer el problema, únicamente habría que tener en cuenta la anchura variable a medida que se avanza a lo largo de la viga, siendo una carga variable linealmente con coordenada en el origen igual a cero. En las tablas se especifica ese caso para extremos empotrados que es lo que corresponde a estos.

Se han definido tres opciones de aplicación a través de la variable accion como ya se ha definido al calcular la acción del viento, de forma que cuando toma el valor 0 no aplica, con valor 1 es viento frontal y con valor 2 es viento fuerte lateral.

```
% ACCIÓN DEL VIENTO
% Presión cte para el área de cubierta correspondiente a cada viga
% Carga rampa por la variación del área
% Las fuerzas externas se expresan en coordenadas globales

accion=0; % 0 => Sin acción del viento
          % 1 => Viento frontal moderado
          % 2 => Viento lateral fuerte

if accion ==1
    qb=16.834; % Pa %Presión de pico sobre la viga
else
    qb=35;
end

qbL=q*(pi*2*R*10^(-3)/32); %N/m % Carga en el extremo inferior de la
viga %para multiplicar por un factor
lineal

if accion>=1
    for i=78:109
        % Ángulo que forma cada viga con el eje X
        ang=atan(COOR(BEAMS(i,1),2)/(COOR(BEAMS(i,1),1)));
        % La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como
        % resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
        % para segundo y tercer cuadrante especifico a qué cuadrante
        pertenece
        % Segundo cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
            ang=ang+pi;
        else
            % Tercer cuadrante
            if (COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
                ang=ang+pi;
            end
        end
        %La evolución del coeficiente de presión es distinta según sea
        barlovento y sotavento
        if cos(ang+(accion-1)*pi/2)>=0 % Barlovento
            cp=(1-cos(ang+(accion-1)*pi/2))*(-2.1)+0.8; %
        else % Sotavento
            cp=(1-cos(ang+(accion-1)*pi/2))*(-2.1)+0.8; %
        end
    end
end
coeficiente de presión
```

```

else % Sotavento
    cp=(1-cos(ang+(accion-1)*pi/2))*0.8-2.1;
    % mv=(-0.5-nv)/Lv;
end

% qbL=qbL*accion; % Para los dos valores establecidos
guarda proporción
% Reacciones verticales en módulo y coordenadas locales
R1=qbL*cp*Lv*7/20;
R2=qbL*cp*Lv*3/20;
% Momentos en los extremos en coordenadas locales
M1=qbL*cp*Lv^2/20;
M2=qbL*cp*Lv^2/30;

% Transformación a coordenadas globales
COOR(BEAMS(i,1),5)=COOR(BEAMS(i,1),5)-R1*sin(theta)*cos(ang);
COOR(BEAMS(i,1),6)=COOR(BEAMS(i,1),6)-R1*sin(theta)*sin(ang);
COOR(BEAMS(i,1),7)=COOR(BEAMS(i,1),7)-R1*cos(theta);

COOR(BEAMS(i,1),8)=COOR(BEAMS(i,1),8)+M1*sin(ang);
COOR(BEAMS(i,1),9)=COOR(BEAMS(i,1),9)-M1*cos(ang);

COOR(BEAMS(i,2),5)=COOR(BEAMS(i,2),5)-R2*sin(theta)*cos(ang);
COOR(BEAMS(i,2),6)=COOR(BEAMS(i,2),6)-R2*sin(theta)*sin(ang);
COOR(BEAMS(i,2),7)=COOR(BEAMS(i,2),7)-R2*cos(theta);

COOR(BEAMS(i,2),8)=COOR(BEAMS(i,2),8)-M2*sin(ang);
COOR(BEAMS(i,2),9)=COOR(BEAMS(i,2),9)+M2*cos(ang);

end
end

```

5.3.5. Exposición de los resultados

Los resultados expuestos predeterminados por el programa no se correspondían con lo que se buscaba en este proyecto, por esa razón se modificó el archivo que se encarga de la visualización de resultados. Como ya se ha comentado en secciones previas los datos de mayor interés son las reacciones en los apoyos por lo que se ha creado un código que reconozca qué puntos se están utilizando como tal y expongan el valor de la reacción. En contraposición se han eliminado los esfuerzos soportados por las vigas pero se ha mantenido la deformación máxima de la estructura.

```

% Mostrar reacciones en los apoyos

for i=1:32
    if COOR(i,4:5)==[0 0]
        disp(i)
        ploads(i,1:3)
    end
end
end

```

5.3.6. Confirmación o cambio de características de los nodos

Una vez ya se tiene la estructura definida y se han especificado las cargas se corre el programa. Este proporciona una ventana interactiva desde la cual se pueden cambiar las características de los nodos e introducir los valores que se quieran, pueden añadirse cargas, fijar grados de libertad, desplazamientos, etc. Para el proyecto presente este recurso se ha utilizado para localizar los nodos que se quieren establecer como apoyos para no estar cambiando el programa cada vez que se simula con unos apoyos distintos. De esta forma se corre el programa y una vez se está en la ventana interactiva se decide qué nodos serán los apoyos y para ellos se selecciona la opción "Clamp" donde automáticamente se impone el valor de 0 a todos los grados de libertad fijándolos. Para liberar los giros se debe cambiar por un 1 los tres últimos componentes.

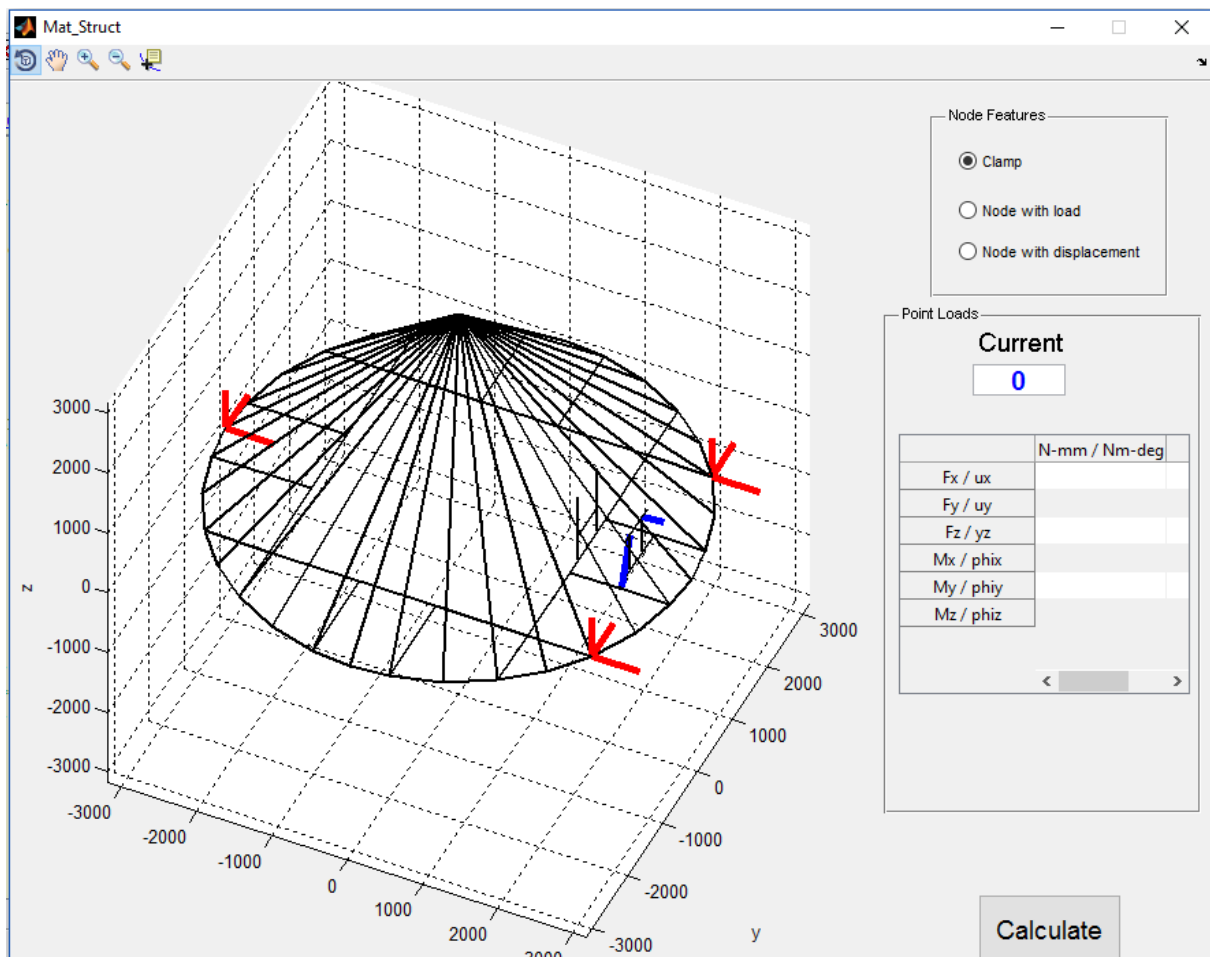


Figura 45. Recurso interactivo del programa de cálculo

5.3.7. Exposición de resultados.

Tras establecer los puntos de apoyo se pulsa el botón "Calculate" dando paso al procesamiento de esta estructura con las restricciones y cargas impuestas. El resultado ofrecido es otro gráfico donde sobre la estructura original se ha dibujado la elástica en

color rojo para apreciar la deformación. Para ello se han utilizado las propiedades de rigidez de las vigas y para una visualización más sencilla se ha multiplicado la deformación por un factor de 8.

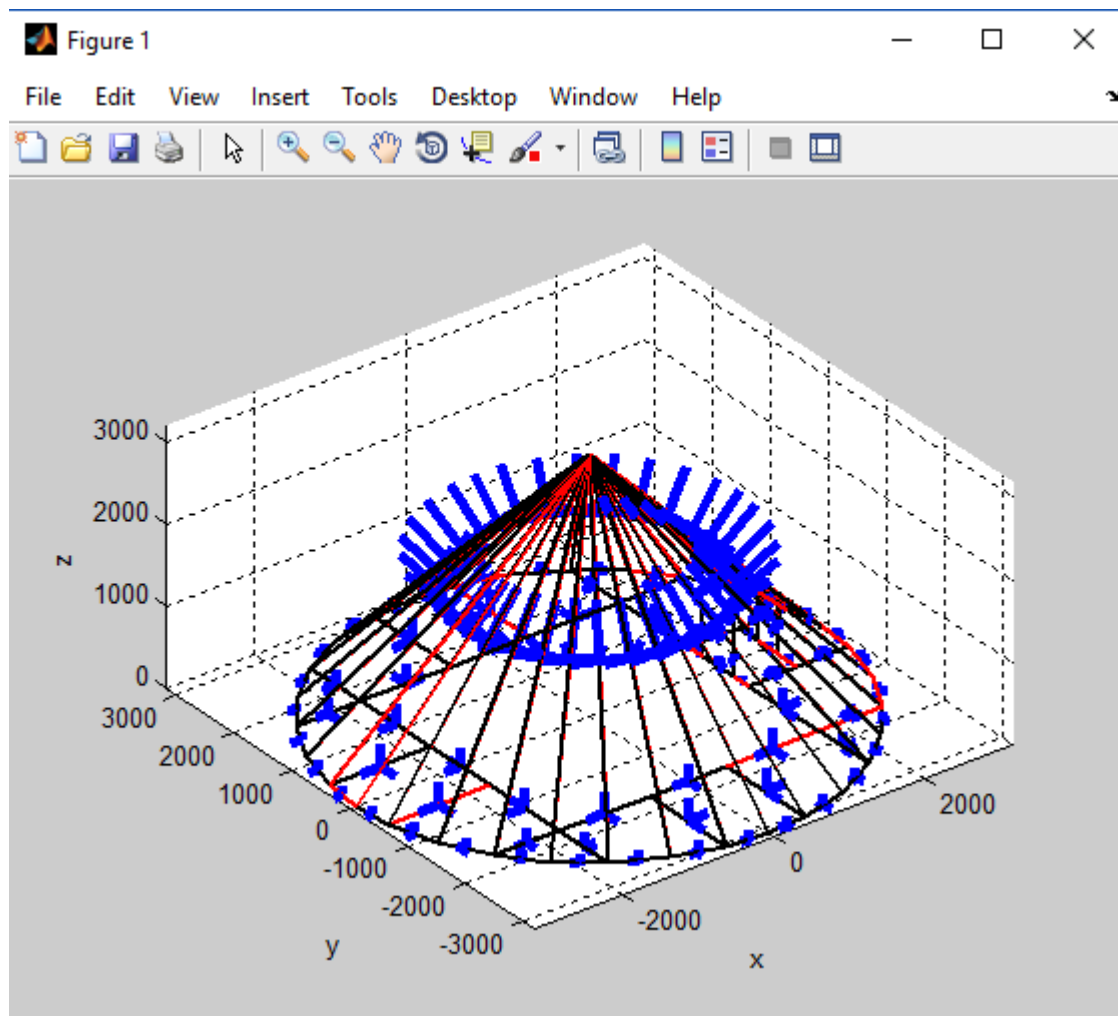


Figura 46. Exposición gráfica de resultados del programa de cálculo

En este caso dada la alta rigidez de la estructura la deformada es prácticamente coincidente con la original.

Además de la solución gráfica ofrece también resultados numéricos como los especificados en el apartado 5. de esta sección.

```
Deformación máxima: 0.004037
Carga axial máxima 521.0599 en los puntos: 48 53
Reacción vertical en el apoyo □
```

```
ans =
|
-104.5370 -242.9418 512.8004
```

```
Reacción vertical en el apoyo □
```

```
ans =
-104.5370 242.9418 512.8004
```

```
Reacción vertical en el apoyo □
```

```
ans =
8.2328 0.0000 16.5191
```

Figura 47. Exposición numérica de resultados del programa de cálculo

5.4. Escenarios posibles

Una vez establecida la estructura y la carga correspondiente del eje y de la cubierta se han calculado diferentes situaciones que dependen de la distribución de los apoyos. Se ha probado con diferentes escenarios posibles teniendo en cuenta que la acción del viento es una variable Booleana, no puede haber carga intermedia, y que los apoyos siempre son 3 para asegurar estabilidad y un contacto constante y estarán distribuidos simétricamente respecto al plano que contiene al eje de las aspas.

A la hora de incluir la acción del viento en los cálculos se han considerado las dos opciones posibles en las que el molino podría encontrarse. La primera de ellas es en funcionamiento normal, con el viento llegando de frente moviendo así las aspas. Esto implicaría que el viento que afecta a la estructura de la capirota se ve ralentizado debido a que parte de la energía que llevaba la han absorbido las palas. A pesar de esto se ha mantenido el valor de la velocidad de pico generada en las turbulencias para considerar la situación más desfavorable y al considerar que el paso tras las aspas genera gran cantidad de turbulencias.

El segundo escenario considera un viento superior al máximo de trabajo del molino debido a límites establecidos por los materiales y la integridad de los mecanismos. En este caso el sistema de seguimiento orienta la cubierta de forma que el viento incida lateralmente evitando así el movimiento de las palas y reduciendo la posibilidad de fallos y roturas. Por todo ello se simula un viento superior al tratado anteriormente coincidiendo con el máximo en los últimos 5 años para asegurar el buen comportamiento de los elementos y con una dirección alterada 90 grados respecto a la frontal. Dada su naturaleza simétrica y la simetría de los apoyos es totalmente irrelevante cuál de los dos laterales se tome como barlovento.

Al determinar los apoyos se restringen ciertos grados de libertad. Para aportar unos resultados lo más cercanos posibles a la realidad se han seleccionado cuidadosamente las simplificaciones realizadas. Los grados de libertad fijados a cero han sido los desplazamientos en las tres direcciones del espacio para cada apoyo. Esto sin embargo no es lo que ocurre realmente. En la estructura real el apoyo solo experimenta una reacción vertical, son los topes laterales los que evitan el desplazamiento en dirección radial y los tubos unidos al eje central los que impiden el movimiento tangencial. Debido a limitaciones en el programa y a las simplificaciones ya realizadas como la transformación de elementos tridimensionales en elementos lineales se hace extremadamente complejo la reproducción de este comportamiento. Además la simplificación que se hace no únicamente se aleja de la realidad en lo que al movimiento tangencial se refiere ya que existen topes laterales en los nodos donde se sitúan los apoyos, la diferencia es que los dos esfuerzos se dividen entre los dos elementos, no soporta el rodamiento ambos. Esto se hace también con la idea de aplicar las fuerzas correspondientes al peso propio de la estructura al mayor número de nudos posibles dado que el programa no permite aplicar fuerzas a un nodo al que se le han restringido libertades.

Por todo ello los resultados obtenidos corresponden a las tres reacciones lineales debidas a las diferentes acciones estáticas de peso propio, peso de la cubierta y el eje, y acción dinámica del viento.

6. RESULTADOS

En este capítulo se presentan y analizan los resultados obtenidos en los diferentes escenarios para extraer conclusiones cuyo objetivo es ayudar en la toma de decisiones a la hora de seleccionar las medidas concretas para solucionar los problemas encontrados en este proyecto. El procedimiento seguido busca ir mejorando el escenario según se van sucediendo las simulaciones, esto es, los últimos escenarios serán los más válidos a la hora de seleccionar soluciones, los primeros ayudan a comprender la razón y el valor de estos últimos.

La estructura de exposición y análisis de los resultados se mantiene constante para las situaciones propuestas. Consta primero de una breve explicación del razonamiento seguido para haber escogido cada escenario. A continuación se exponen los resultados obtenidos a través del programa utilizado y por último se realiza un análisis de los mismos llegando a una serie de conclusiones.

Los escenarios se diferencian unos de otros únicamente por la distribución de los tres apoyos, sin embargo dentro de cada uno de ellos se han calculado las reacciones sin acción dinámica del viento, con viento frontal, aprovechado parcialmente por las aspas y con viento lateral por superar un valor umbral. En general esta última situación es la que ofrece los resultados más desfavorables que deberán soportar los rodamientos. Las otras dos situaciones también han sido analizadas dado que son la que experimentará el molino la mayor parte del tiempo ya que el emplazamiento de la construcción no presenta valores altos y constantes del viento, tal y como se explica en apartados previos.

Una vez seleccionados los nodos destinados a funcionar como apoyos, como ya se ha explicado en el apartado de cálculos, se restringen los movimientos lineales en las tres direcciones del espacio pero no los giros. Esto implica que se obtienen tres reacciones correspondientes a estos movimientos pero ningún momento. De estas reacciones en los apoyos solo se tiene en cuenta la vertical ya que es la que deben soportar los rodamientos seleccionados, las otras son soportadas por elementos que no presentan problemas. Por tanto los resultados mostrados en las siguientes secciones se corresponden con las reacciones verticales en los apoyos. A pesar de la distribución simétrica se diferencian los tres apoyos debido a la diferente carga soportada en el caso de la carga del viento incidente lateralmente. Para diferenciar los apoyos se utilizarán los subíndices:

1 y 2 para diferenciar entre los que tengan una situación simétrica.

Además de las cargas verticales el programa muestra la deformación máxima sufrida por las vigas pero dado que nunca supera los dos milímetros y adicionalmente al aplicar las cargas en los nodos no tiene en cuenta la deformación real de la barra.

6.1. Un apoyo frontal y dos traseros

La solución del apoyo frontal se basa en una solución propuesta con cuatro apoyos donde dos de ellos se situaban muy juntos bajo los apoyos del eje y dos en la parte posterior más separados, tras establecer que es conveniente utilizar solo tres apoyos se unieron los dos más próximos entre ellos ya que suprimir uno de la sección de sotavento desestabilizaría por completo la estructura. Esta distribución por tanto busca limitar los esfuerzos soportados por las vigas por causa del eje situando un apoyo en el punto más cercano posible. La transmisión de esfuerzos a ese punto es muy rápida.

El objetivo de los otros dos apoyos es principalmente mantener la estabilidad y evitar el vuelco, aparte por supuesto de soportar el resto del peso.

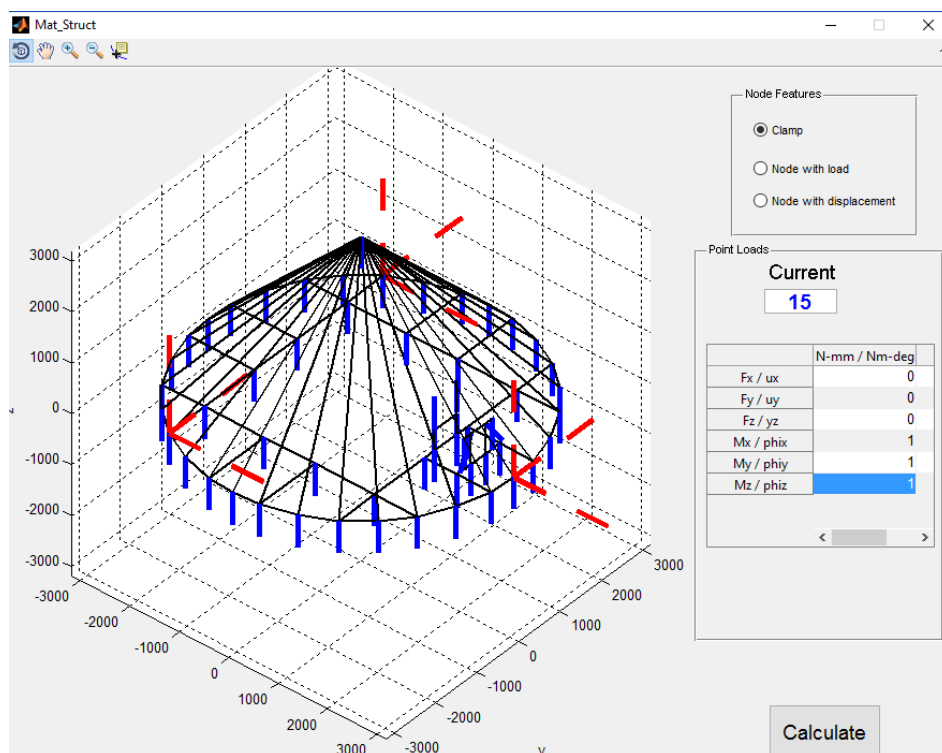


Figura 48. Recurso interactivo en el caso de un apoyo frontal y dos traseros

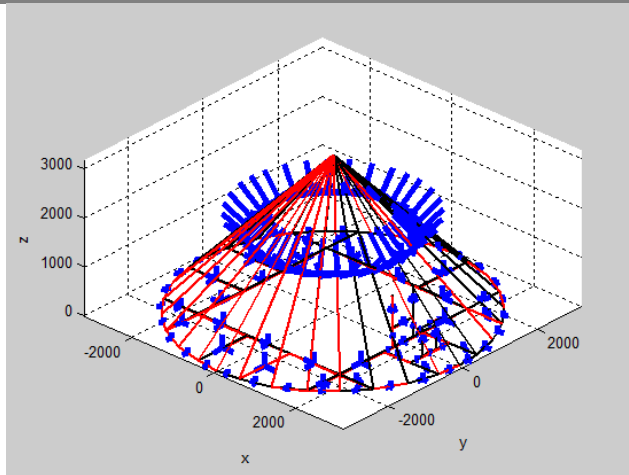


Figura 49. Exposición gráfica de resultados para un apoyo frontal y dos traseros.

APOYOS	SIN CARGA DINÁMICA (kN)	ACCIÓN FRONTAL DEL VIENTO (kN)	ACCIÓN DEL LATERAL DEL VIENTO (kN)
Frontal	12,90	12,85	12,78
Trasero ₁	8,61	8,54	8,54
Trasero ₂	8,61	8,54	8,43

Tabla 7. Reacciones en los apoyos para uno frontal y dos traseros

Como se puede ver en la tabla el apoyo frontal soporta una carga un 50% mayor que la que deben aguantar los apoyos traseros. Esto es un resultado esperado pero eso no lo convierte en bueno, se debe buscar una distribución que tenga menor diferencia para asegurar un comportamiento similar entre rodamientos.

Como factor agravante se debe tener en cuenta que este apoyo sobre el que recae la mayor proporción de carga no sería soldado a una de las vigas estructurales, si no a la pletina exterior necesitando de rigidizadores y superficies adicionales para asegurar una soldadura correcta. Esto supone también que estos elementos deben ser capaces de soportar la misma carga ya que se transmite a través de ellos. Los apoyos traseros si tienen la posibilidad de ser soldados a las vigas, en los puntos seleccionados estas sí que existen.

6.2. Un trasero y dos frontales separados

Viendo los resultados anteriores se ha decidido invertir la distribución de los apoyos quedando con uno atrás y dos delante relativamente separados. El objetivo es tener más apoyos en la parte delantera para cargar con el eje manteniendo una colocación lo más distribuida y simétrica posible.

Existe además otra razón para utilizar esta distribución que contribuye a soportar el peso del eje. Este motivo es que las vigas a las que se soldarían los apoyos frontales es en realidad una única viga transmitiéndose los esfuerzos de forma más directa hasta los rodamientos.

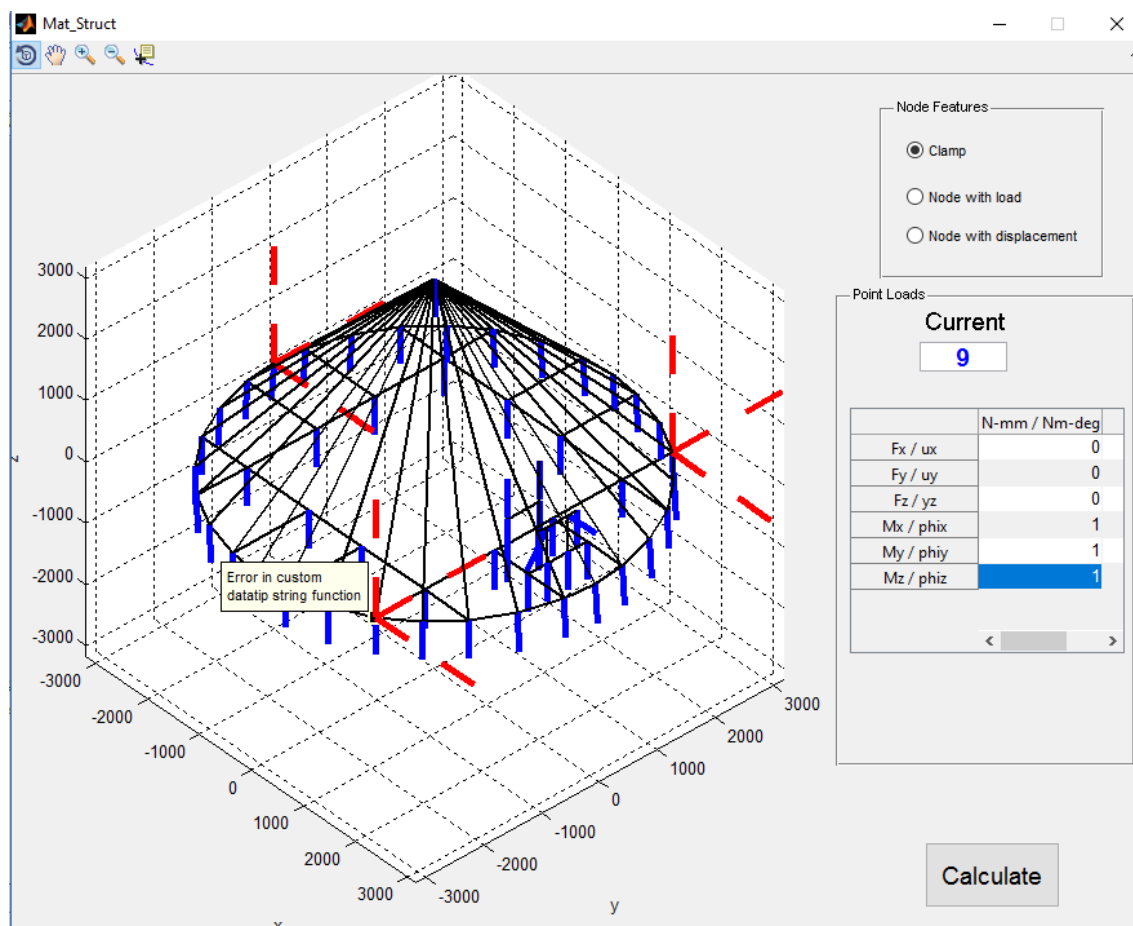


Figura 50. Recurso interactivo en el caso de dos apoyos frontales abiertos y uno trasero

APOYOS	SIN CARGA DINÁMICA (kN)	ACCIÓN FRONTAL DEL VIENTO (kN)	ACCIÓN LATERAL DEL VIENTO (kN)
Frontal₁	10,69	10,64	10,50
Frontal₂	10,69	10,64	10,61
Trasero	8,75	8,65	8,63

Tabla 8. Reacciones en los apoyos para dos frontales abiertos y uno trasero

Tras estos resultados se confirma que el hecho de una distribución lo más simétrica posible se traduce en cargas más repartidas. Se comprueba al observar que la máxima carga en este caso corresponde a los apoyos frontales y que es la carga máxima más baja que se ha obtenido en las simulaciones.

A pesar de esto se puede deducir que el hecho de que la carga del eje no se aplique sobre la viga a la que se sueldan los apoyos implica que no se está transmitiendo tanta carga directamente como se pensaba en un principio. La deformación que pueda existir en los tramos intermedios aunque no provoque roturas en las vigas puede generar pequeñas inestabilidades o desplazamientos en el eje que se vean ampliados en el punto en el que se unen las aspas. Se debe fijar lo máximo posible el eje y reducir sus movimientos.

6.3. Un trasero y dos frontales juntos

Una vez conocidos los valores que tienen que soportar los apoyos cuando se utiliza un solo apoyo frontal se ha decidido colocar la distribución simétrica de manera inversa, con dos apoyos frontales y uno atrás. Con esta manera se busca repartir el peso del eje entre dos apoyos y no concentrarlo todo en uno .

Se han situado más juntos de lo que debería si se buscara una forma más equitativa, de triángulo equilátero, para evitar grandes desplazamientos en las vigas y sus consiguientes esfuerzos. La ubicación en estos puntos busca distribuir la carga pero al mismo tiempo intenta como en el primer escenario, situarse lo más cerca posible de los puntos de aplicación de la carga.

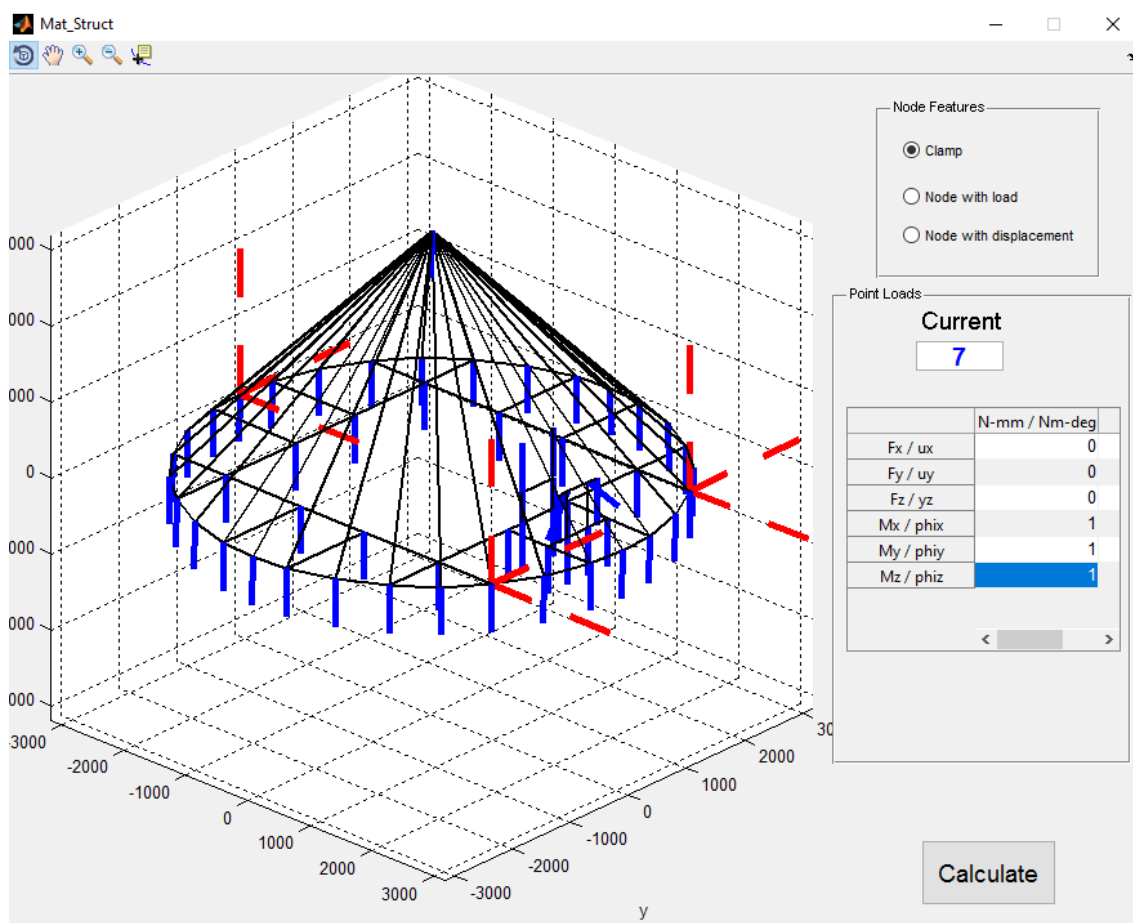


Figura 51. Recurso interactivo en el caso de dos frontales próximos y uno trasero.

	SIN CARGA DINÁMICA (kN)	ACCIÓN FRONTAL DEL VIENTO (kN)	ACCIÓN LATERAL DEL VIENTO (kN)
Frontal₁	9,01	8,97	9,06
Frontal₂	9,01	8,97	9,24
Trasero	12,10	11,99	11,46

Tabla 9. Reacciones en los apoyos para dos frontales próximos y uno trasero

Con estos resultados se aprecia una cierta mejora respecto a los obtenidos con la distribución de un único apoyo frontal. En este caso la diferencia entre los apoyos frontal y el trasero es de un 30% en comparación con el 50% de la otra.

A pesar de la carga impuesta por el eje, la que supone la cubierta sigue siendo la principal, por esa razón el apoyo trasero soporta la mayor carga. Sin embargo el hecho de que los apoyos frontales soporten menos carga que si estuviesen en una posición más regular cumple con la función que se buscaba, limitar la deformada provocada por el eje.

7. SOLUCIONES PROPUESTAS

A continuación se exponen soluciones a los problemas que deben ser solventados para que pueda funcionar el molino y a aquellos que pueden mejorar el rendimiento del mismo sin que esto implique un coste demasiado elevado para la Fundación Carral.

7.1. Apoyos de la cúpula

Tras los fallos de los anteriores diseños se ha decidido reducir el número de apoyos y aumentar por otro lado la carga máxima que puedan soportar. Como ya se ha explicado con anterioridad se ha decidido utilizar únicamente tres apoyos porque es la única forma de asegurar que siempre estarán en contacto, soportando la carga. Con tres puntos se define un plano por lo que al utilizar de más se incrementan las posibilidades de que esos puntos no pertenezcan al mismo plano. Para que estuviesen en contacto permanente se debería asegurar una precisión en todos los elementos involucrados que no se tiene. El montaje del raíl y la soldadura de los apoyos generan una cantidad de imperfecciones inasumible, lo que lleva a la necesidad de usar únicamente 3 apoyos.

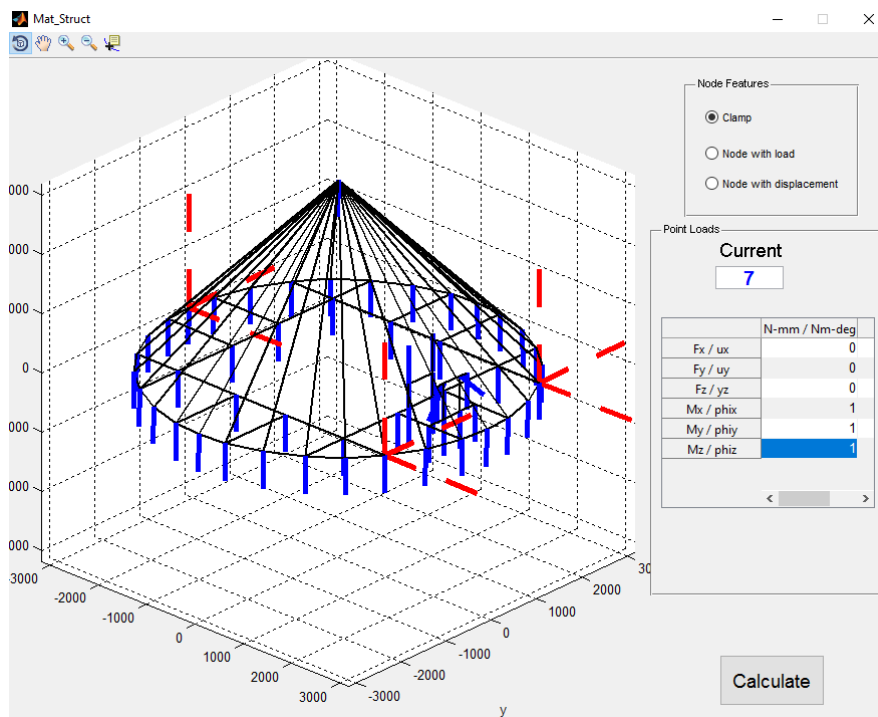


Figura 52. Distribución definitiva de los apoyos

La distribución de estos tres apoyos ya se ha justificado en el apartado de resultados, en este capítulo se propone un modelo y un diseño concreto del rodamiento.

En cuanto al modelo seleccionado se ha atendido a los resultados de las cargas verticales y se ha sobredimensionado para asegurar la estabilidad ante comportamientos atípicos

como baches en el raíl que supongan pérdida de contacto de alguna roldana trasladando la carga momentáneamente a los otros dos apoyos. Por ello se ha escogido el modelo NUTR 45100 del fabricante SKF que aguanta una carga estática de 80 kN cada roldana, más del doble de lo que soportaban las anteriores transfer balls y teniendo en cuenta que la carga máxima calculada para esta distribución es de 12 kN.

NUTR 45100 A

Dimensions

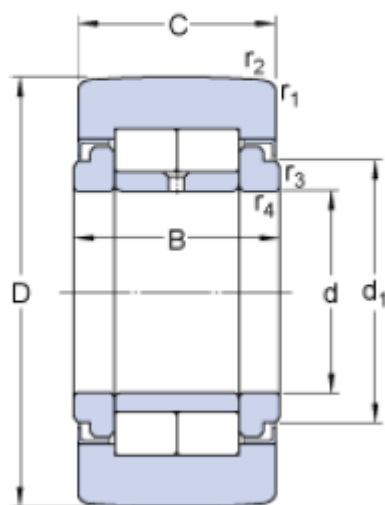


Figura 53. NUTR 45 100

Calculation data

Basic dynamic load rating	C	73.7	kN
Basic load rating, static	C ₀	104	kN
Fatigue load limit	P _u	12.7	kN
Maximum static radial loads	F _r	80	kN
Maximum static radial loads	F _{0r}	114	kN
Limiting speed		1700	r/min

Tabla 10. Propiedades de la roldana. Fuente SKF

Dada la función de estas roldanas no se establece un cálculo de vida ya que esto se basa en las revoluciones. Estas roldanas tienen como principal función soportar un carga estática, el hecho de ser roldanas es únicamente para posibilitar el giro de la cubierta pero en ninguno momento se llegará a un número de revoluciones que necesite un cálculo de su vida útil.

Existen dos opciones de montaje de estas roldanas.

La primera consiste en colocar 2 en cada apoyo necesitando de un total de 8 unidades, colocadas de tal forma que no estén en línea si no formando un pequeño ángulo para poder seguir la trayectoria circular de la circunferencia impuesta por el perfil en U que hace de raíl. El ángulo se calcula simplemente considerando el radio de la circunferencia y la separación entre las dos roldanas cuando se encuentran montadas en la pieza de unión para que la trayectoria sea siempre tangente.

Este pequeño giro necesario implica un leve esfuerzo axial sobre los rodamientos que lo pueden soportar sin problemas siguiendo las indicaciones del fabricante SKF. La pieza sobre la que se montan las roldanas es de fácil mecanizado y va encajada en la estructura de la cúpula. Lo que busca es absorber las imperfecciones que puedan existir en el raíl y de paso distribuir la carga entre los rodamientos. Al estar tan pegados actuarán como uno solo, no sustituye a otro apoyo situado en otro lado en lo que a determinar el plano de apoyo se refiere ya que permite la oscilación pudiendo ajustarse a este plano.

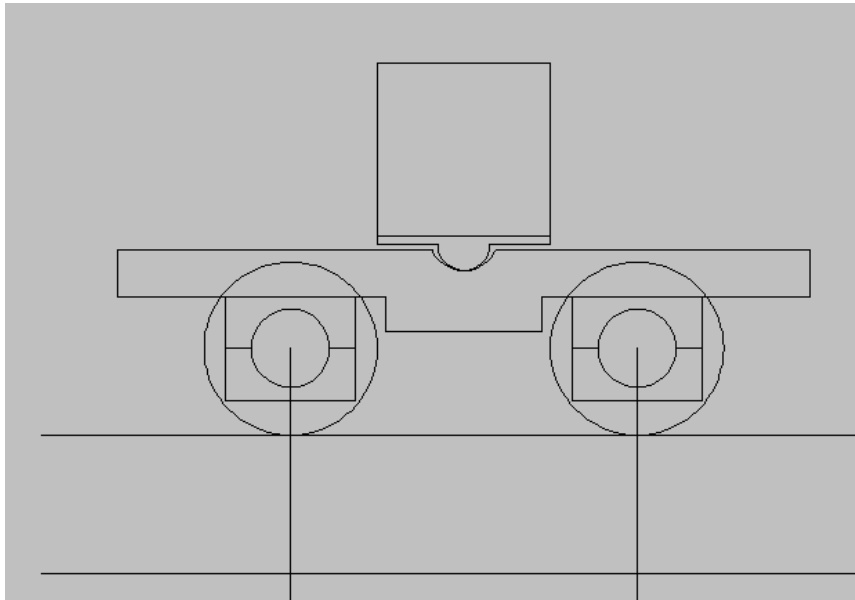


Figura 54. Propuesta de apoyo con dos roldanas

Por otro lado está la opción de utilizar únicamente una roldana por cada apoyo lo que implicaría que la pieza que incluyese la roldana iría soldada directamente a la estructura.

Esta configuración es ventajosa económicamente ya que en vez de seis roldanas solo harían falta 3, reduciendo el coste a la mitad. Y teniendo en cuenta que cada roldana cuesta 300 € supone un ahorro considerable, sin contar el montaje y la mecanización de la pieza, donde esta última configuración es también más simple. Para justificar la utilización de esta opción existen las siguientes razones:

Atendiendo al cálculo una roldana ya está sobredimensionada sobre la carga real que va a soportar, añadir otra para cada apoyo sería sobredimensionarla aún más, algo que se puede considerar innecesario. Por otro lado está el esfuerzo axial al desplazar la roldana fuera de su trayectoria recta, pero al igual que sucedía en el otro caso el rodamiento es

perfectamente capaz de aguantarlo. Y en lo referente a las oscilaciones que puedan producirse al avanzar por el raíl se debe considerar que la mayor parte del tiempo el molino se encontrará con la cubierta parada, por lo que no supone ninguna desventaja.

Por tanto comparando las ventajas e inconvenientes y teniendo en cuenta especialmente el factor económico se decide finalmente instaurar esta segunda configuración con una única roldana por apoyo.

7.2. Multiplicadora

La máquina encargada de aumentar la velocidad de giro ha sido determinada por el trabajo realizado por José Manuel Frías y Rubén Muñoz en sus respectivos proyectos fin de carrera. Atendiendo al par generado por los vientos, las revoluciones del eje del molino y las revoluciones a las que debe trabajar el alternador se han establecido los puntos de funcionamiento y la relación idónea de la caja multiplicadora.

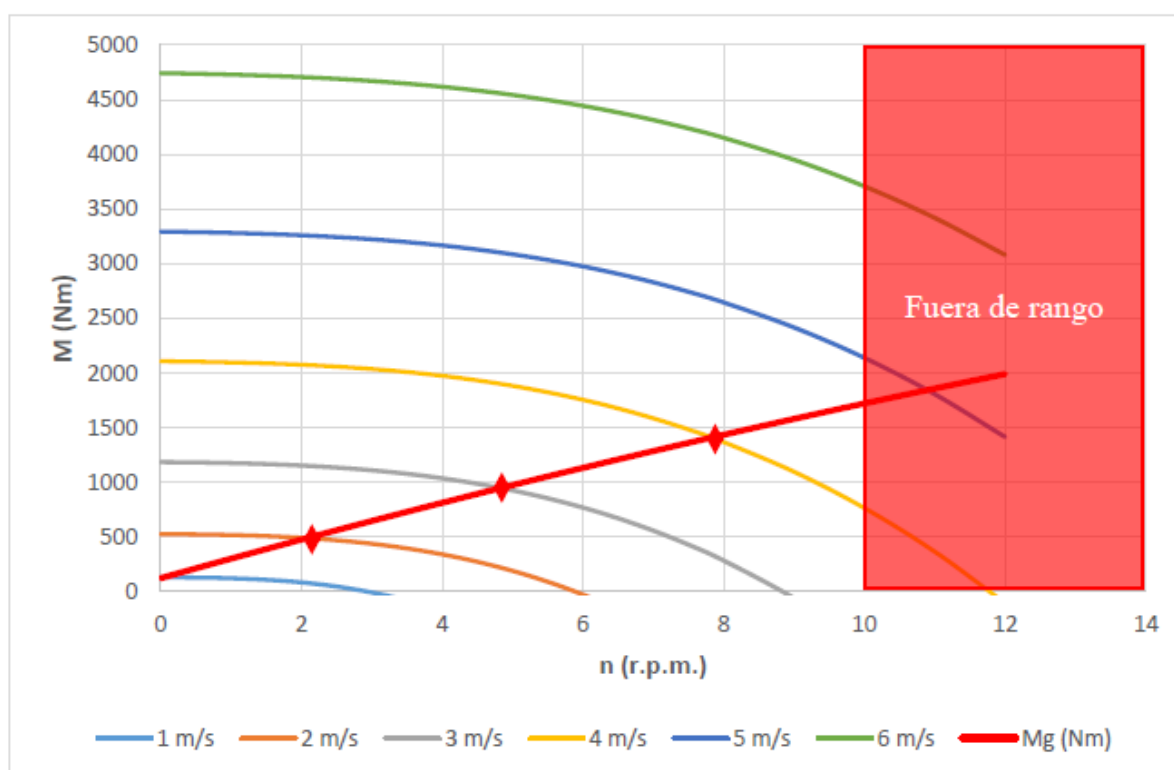


Figura 55. Puntos de funcionamiento

La elección final es la de 10,72 ofrecida por el fabricante LENZE.

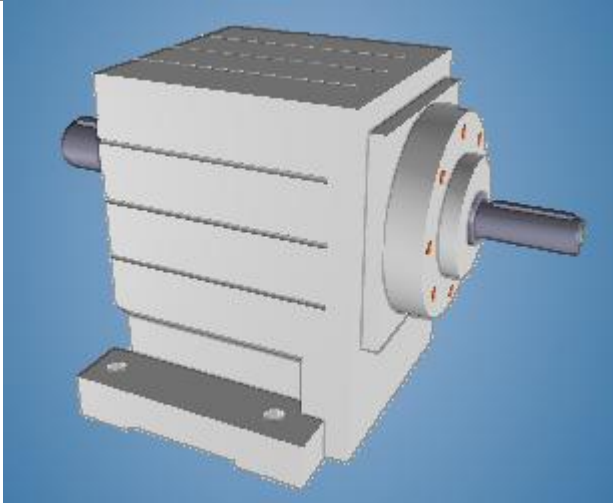


Figura 56. Multiplicadora seleccionada

Como ya se ha visto en apartados anteriores la multiplicadora se encontraba situada contigua al eje de revolución de las aspas colocada en la misma pieza mediante la que se conecta este al soporte central que se muestra en la fotografía.



Figura 57. Soporte central

Para que la ubicación de la multiplicadora no cree momentos que amplifiquen los efectos de las irregularidades del eje y creen esfuerzos añadidos a los distintos elementos se ha pensado en situarla en un lugar alineado con el eje. Y debido al tamaño de la multiplicadora y al del generador el volumen libre debe ser lo suficientemente grande.

Siguiendo estos dos requisitos se ha llegado a la conclusión de que el óptimo lugar para ubicarlos es en la zona situada bajo el eje en la parte delantera.



Figura 58. Nueva ubicación multiplicadora

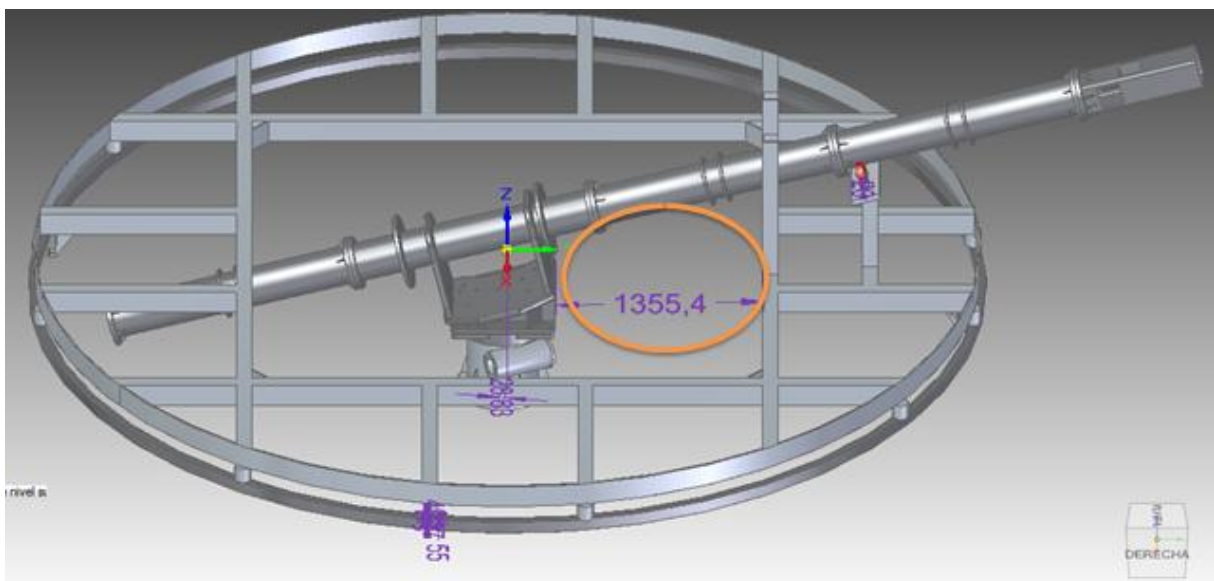


Figura 59. Plano de la nueva ubicación de la multiplicadora

Aprovechando la estructura circundante se ha diseñado una chapa de acero que servirá de soporte para la multiplicadora.

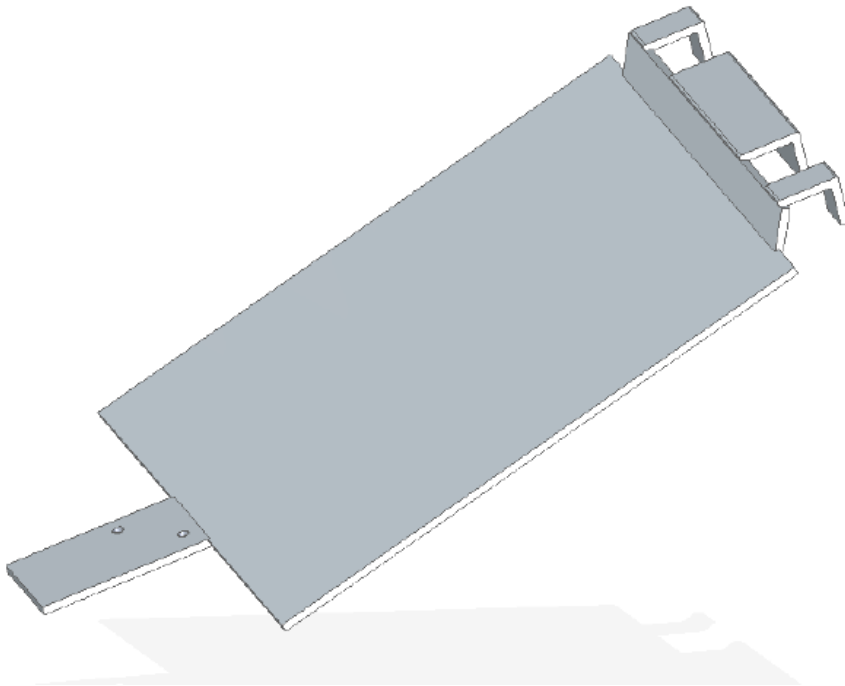


Figura 60. Soporte multiplicadora aislado

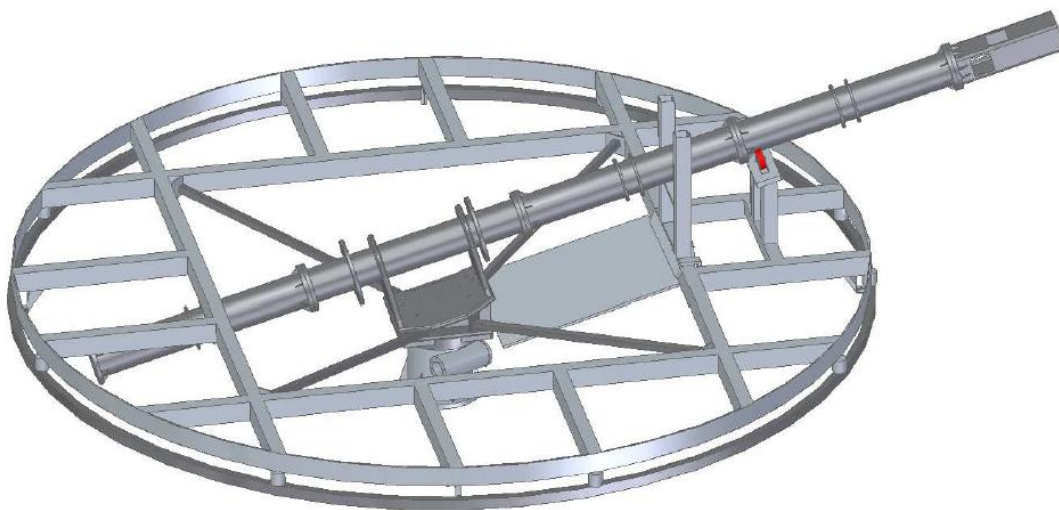


Figura 61. Soporte multiplicadora en conjunto

El peso de la multiplicadora ronda los 1500 kg lo que supone que se necesitará un grosor elevado de la chapa para soportar la carga. Este peso se distribuye entre los dos apoyos y suponiendo que la mitad va para cada uno significa que sobre los nudos afectados de la estructura se aplica una carga de 750 kg aproximadamente.

Se ha realizado un nuevo cálculo añadiendo este peso repartiéndolo entre los cuatro nudos entre los que se apoya el soporte.

% ACCION POR EL PESO DE LA MULTIPLICADORA
 % Se aplica entre los cuatro nudos involucrados entre los que se apoya
 % el soporte

```
Fm=2500;      % N

for i=34:50
    if i==34 || i==35 || i==49 || i==50
        COOR(i,7)= COOR(i,7)-Fm/4;
    end
end
```

El resultado obtenido ha sido el siguiente para la distribución previamente elegida:

APOYOS	SIN DINÁMICA (kN)	CARGA ACCIÓN DEL VIENTO (kN)	FRONTAL ACCIÓN DEL VIENTO (kN)	LATERAL ACCIÓN DEL VIENTO (kN)
Frontal ₁	10,19	10,15	10,00	
Frontal ₂	10,19	10,15	10,18	
Trasero	12,23	12,12	12,08	

Tabla 11. Reacciones en los apoyos con peso de la multiplicadora

Con lo que se confirma que la selección de la distribución es la adecuada. Los valores de carga soportada están igualados en los tres apoyos y se consigue reducir las deformaciones y por tanto los esfuerzos en las barras.

7.3 Topes laterales

Como se ha visto previamente el problema de estos topes es que están rayando el perfil en U sobre el que gira la cubierta por ser el material de la rueda más duro que el propio perfil. Para solucionar este problema se han contemplado también dos posibilidades.

- Ruedas de poliamida.
Esta medida consiste en sustituir las roldanas actuales por unas de poliamida que absorban el choque y no rayen el raíl.
- Sistema amortiguamiento.
Implicaría cambiar la estructura que ahora integra las ruedas que evitan el desplazamiento radial por una con muelle para asegurar un contacto permanente y un funcionamiento más suave. Para este caso también habría que cambiar las ruedas actuales por otras de un material más blando.

Una vez estudiado el sistema y las opciones se ha comprobado que el margen de movimientos, es decir el espacio máximo cuando la roldana no hace contacto es suficientemente pequeño para no necesitar de una estructura con amortiguación. Con una rueda de poliamida es suficiente para absorber el impacto.

A través de la información obtenida de los resultados sobre la carga que debe soportar en sentido radial y el espacio que existe se propone el siguiente modelo para su montaje:

Rueda de poliamida de 125 mm de diámetro capaz de soportar 1500 kg con rotante fijo. Modelo Q Categoría 7. Referencia QPF7 125 POB6. Proveedor: Gayner.

RUEDA QUE SE MONTA EN EL SOPORTE

PO - Poliamida: Ver página 35

Núcleo: Monobloque de poliamida
Banda: (85° SHORE D)
Temperatura: -30°C a +80°C
Propiedades:
Muy alta capacidad de carga
Baja resistencia a la tracción
Resistentes a la corrosión



Diámetro rueda (mm)	Ancho rueda (mm)	Cojinete rueda	Radio de giro (mm)	Radio de giro (mm)	Altura rotante (mm)	Carga máx. (kg)	Rotante giratorio		Rotante fijo		Rotante giratorio con freno	
												
A	B		G	G'	H		Código	Referencia	Código	Referencia	Código	Referencia
125	55		120	120	175	1500	37-40/6	QPG7 125 POB6	37-41/6	QPF7 125 POB6	37-40/6-FD	QPG7 125 POB6-FD
150	55		130	135	200	1500	37-50/6	QPG7 150 POB6	37-51/6	QPF7 150 POB6	37-50/6-FD	QPG7 150 POB6-FD
200	55		155	160	250	1500	37-60/6	QPG7 200 POB6	37-61/6	QPF7 200 POB6	37-60/6-FD	QPG7 200 POB6-FD

Figura 62. Rueda tope lateral

Por el tamaño de estas ruedas hay que realizar un ajuste en la pieza donde se montan ya que está pensada para el modelo actual de menor tamaño, de todas formas no es una operación en absoluto costosa.

Se recomienda como mínimo utilizar tres de estos topes pero dado a que la estructura cuenta con cuatro repartidos equitativamente a lo largo del perímetro se decide aprovechar los elementos de montaje.

Se ha seleccionado una rueda de poliamida porque este material absorbe las irregularidades que pudiesen existir en el lateral y su gran espesor permite que los elementos de la estructura sufran lo mínimo al deformarse y eliminar esfuerzos en otras partes de la estructura. Como se puede ver en el catálogo las condiciones que soporta hacen factible su uso en un ambiente como en el que se pretende que trabajen con soportando corrosión y un amplio rango de temperatura.

Dentro de los modelos presentados el modelo de menor tamaño es la elección final por intentar variar lo menos posible respecto a las anteriores y porque no existe necesidad de uno más grande. El rotante seleccionado es obviamente el fijo ya que su uso al que está destinado es únicamente rodar en una única dirección, no necesita de freno ni giro. Se puede aprovechar esta pieza para unirla directamente a la ya existente asegurando un comportamiento correcto y un fácil montaje.

DESARROLLO DEL PROYECTO

El presente capítulo está destinado a orientar sobre la estructuración de este trabajo y exponer el coste implicado, tanto temporal como económico, incluyendo datos reales sobre componentes estructurales existentes y estimaciones sobre las soluciones propuestas.

FASES DEL TRABAJO

Esta sección se ocupa de explicar detalladamente las fases que ocupó este proyecto para ser realizado, las distintas partes en las que se organizó para su ejecución. Se ha añadido también una distribución temporal para una mayor comprensión de cada etapa.

Recolección de datos

Al tratarse de un proyecto de ingeniería existente sobre el que había que realizar un estudio para poder tomar ciertas decisiones la primera fase consistió en la obtención de información referente a este proyecto. Era necesario reunir todos los datos posibles para reducir el número de suposiciones que pudiesen ofrecer resultados distintos a la realidad.

Esta recolección de información se basó especialmente en contactar con una persona implicada en el diseño y construcción del molino como es el ingeniero responsable al que se le solicitó cuantos datos pudiese ofrecer. Esto incluyó reuniones personales para conocer los detalles de la edificación, el objetivo de la instalación y la sucesión de los problemas que habían ido apareciendo así como la opinión personal de este profesional sobre las posibles causas de los fallos.

De esta forma se conoció el conflicto comentado en los capítulos iniciales entre esta persona y la empresa suministradora de la mayor parte de los elementos tecnológicos encargados de los elementos de transformación de la energía eólica en mecánica y posteriormente a eléctrica. Esta situación supuso pérdida de parte de la información necesaria para este proyecto como son las propiedades del eje de las aspas del molino y datos sobre las dimensiones del conjunto de la estructura, la cual además se había modificado para adecuar el diseño y atender la aparición de ciertos problemas. Para poder recabar esta información se realizaron sucesivas visitas al emplazamiento de la instalación para la toma de datos sobre dimensiones y distribución de los elementos del conjunto aprovechando para obtener material fotográfico y un conocimiento más en detalle del conjunto sobre el que se estaba trabajando.

Al mismo tiempo se mantuvo contacto con el propietario y con la persona responsable financiera de La Fundación Carral, organización propietaria del terreno y la que encargó la construcción del molino, para estas reuniones no hizo falta el traslado hasta Toledo.

Por esta vía se obtuvieron parte de los datos que se pensaron retirados por la empresa tecnológica suministradora y los referidos a la parte económica.

De manera intermitente a lo largo de todo el desarrollo del trabajo se mantuvo una comunicación con las otras dos partes implicadas en el proyecto encargadas de la parte aerodinámica y eléctrica de la instalación, necesitando en ocasiones de reuniones presenciales para la puesta en común de los avances.

Realización de planos

Por las características del proyecto es necesario conocer la estructura actualizada para poder hacer un estudio acertado, sin embargo los planos de la instalación constituyen por sí mismos un objetivo de este proyecto como elemento esencial para la organización propietaria del molino cuyos datos no estaban actualizados.

Una vez se obtuvieron algunos de los planos de la estructura original, se conocieron los perfiles de las vigas utilizadas y se hubieron tomado las medidas suficientes para poder reproducir la estructura actual se procedió a la reproducción del conjunto a través de la herramienta de dibujo SolidEdge. Se ha utilizado este software por ser el instruido en la ETSII.

Documentación

Para una mejor comprensión del proyecto y con la intención de encontrar alguna idea en la literatura esta parte del proyecto se realizó una vez se hubo recabado toda la información y ya se conocía con detalle todo lo relativo al molino.

Se hizo un breve estudio de la energía eólica y sus límites ampliando parte del conocimiento adquirido en la propia ETSII para terminar realizando un enfoque más personalizado referido a la localización de la edificación objeto de estudio. El proceso de formación constó también de un estudio del molino y se concretó posteriormente en la búsqueda de casos similares de energización de molinos de viento clásicos transformados para la obtención de electricidad. Los casos hallados no fueron numerosos ni aportaban mucha información, en su gran mayoría se encuentra protegida, pero permiten certificar que es algo totalmente realizable.

Cálculos y simulaciones

Fase principal del proyecto para poder extraer conclusiones y proponer soluciones.

La herramienta principal de trabajo y la que aporta los resultados definitivos para poder usarlos es el programa creado en el Departamento de Ingeniería de Máquinas que utiliza el entorno MATLAB para realizar la simulación. El uso apropiado de este instrumento necesitó de una fase previa de comprensión del programa y sus fundamentos de cálculo para poder introducir los datos obtenidos de cálculos previos y de la información recabada.

Estos cálculos previos se corresponden principalmente a cálculos de fuerzas y propiedades de elementos estructurales con la idea de ser simplificados y poder introducir los resultados en el programa de la forma apropiada para que este pueda

operar con ellos. También engloba a la acción dinámica del viento la cual necesitó del Eurocódigo 1 y cierta combinación de métodos para poder calcularla.

Una vez se tenían las cargas y propiedades se procedió a la escritura en lenguaje de MATLAB para introducir los datos y dibujar y simular la estructura en diferentes situaciones para tener resultados de los escenarios posibles con diferentes posibles soluciones.

Resultados y Soluciones

Los valores obtenidos se compararon para determinar la solución óptima de las simuladas y a partir de ese punto se buscaron soluciones más concretas. Se pensaron modelos concretos de rodamientos y se diseñaron piezas para servir como soporte de multiplicadora y ubicación de los rodamientos de apoyo.

Según se iban obteniendo resultados y se pensaba en posibles soluciones se debatía su valor y se compartían con el ingeniero responsable con la finalidad de llegar a una solución contrastada y aprobada por ambas partes.

Elaboración del documento

Desde la fase de documentación de ha trabajado en la redacción de este trabajo de manera simultánea al resto de fases según se iba avanzando en cada una para poder transmitir el máximo de información y de la manera más acorde posible a como se ha producido.

Distribución temporal

Para una fácil visualización de las tareas

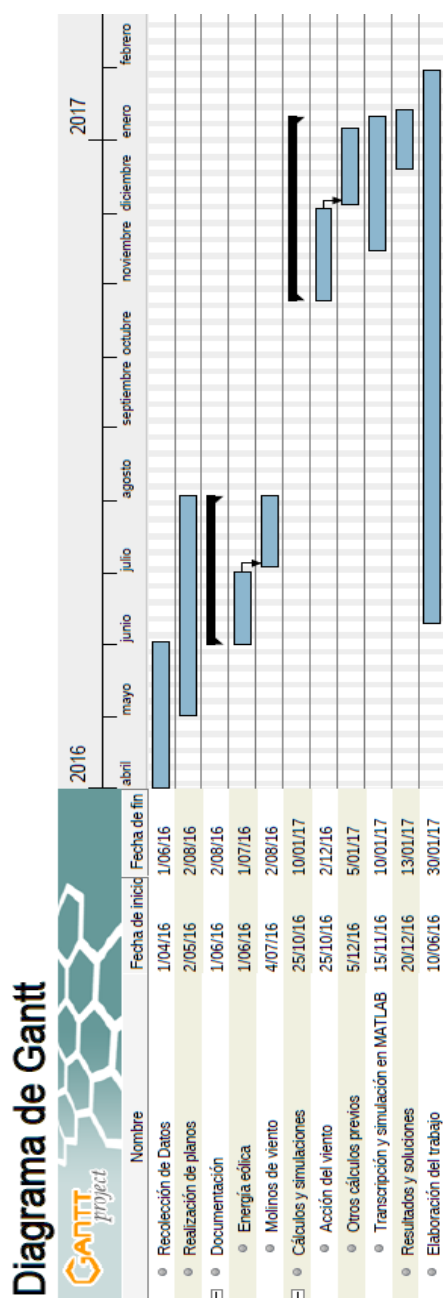


Figura 63. Diagrama de Gantt

ESTUDIO ECONÓMICO

El estudio económico correspondiente a este proyecto en sí mismo no incluye la compra de ningún elemento, estaría constituido únicamente por las horas de trabajo dedicadas, tanto del alumno como de los tutores y de las personas involucradas y los recursos informáticos utilizados. Sin embargo dado que se trata de un proyecto existente en el que ya se ha invertido una cantidad de dinero en absoluto despreciable y que a partir de las

conclusiones obtenidas de este proyecto como de las partes complementarias de aerodinámica y máquinas eléctricas se necesitará comprar e instalar nuevos elementos con su consiguiente coste se incluye en este proyecto los presupuestos de la estructura actual y las estimaciones de las soluciones propuestas.

En primer lugar se va a mostrar lo que explícitamente ha requerido este proyecto para después enseñar el gasto económico en que se incurrió para la construcción y funcionamiento del mecanismo del molino manchego y poder así apreciar el coste de los elementos con los que se está trabajando, el presupuesto total se adjunta en el ANEXO IV, finalmente se presentará el presupuesto estimado de los elementos necesarios para la solución propuesta.

A continuación se presenta una estimación de las horas de trabajo dedicadas correspondientes a las diferentes fases donde los desplazamientos al emplazamiento del molino están incluidos en la etapa de recolección de información.

Trabajo del alumno	380
Recolección de información	40
Realización de planos	40
Documentación	70
Cálculos y simulaciones	90
Resultados y soluciones	70
Elaboración del documento	70
Trabajo del tutor	25
Tutorías	15
Revisión Documento	10

Tabla 12. Distribución de horas de trabajo

Valorando estas horas a un precio medio típico para el alumno y otro para los tutores se tiene la siguiente valorización económica:

Concepto	Horas	Precio (€/h)	horario	Precio total (€)
Trabajo del alumno	380	15		5700
Trabajo del tutor	25	40		1000
TOTAL				6700

Tabla 13. Coste por horas de trabajo

Además del coste horario se debe cuantificar los recursos informáticos utilizados atendiendo al uso del ordenador en sí y por haber recurrido a diferentes softwares con sus correspondientes licencias. Las herramientas utilizadas han sido:

- Microsoft Office, licencia estimada en unos 500 €.
- SolidEdge ST8 (SIEMENS), licencia gratuita para estudiantes.
- MATLAB, licencia gratuita para alumnos de la escuela.

El ordenador utilizado ha sido siempre el mismo, con una antigüedad de 5 años con lo que se estima un coste apropiado de 300€.

Por otro lado se debe considerar el coste de la estructura actual para poder valorar correctamente el trabajo aportado por este proyecto considerando que si la situación no se solucionase se estaría desperdiciando esta cantidad de dinero. La inversión buscaba ofrecer un servicio que se recuperará una vez entre en funcionamiento por lo que desde el punto de vista de este proyecto la ganancia sería mucho mayor que los costes necesarios para arreglarlo.

Concepto	Precio (€)
CUBIERTA	14.737,80
'Ud. Estructura metálica para cubierta compuesta por tubo estructural y pletina de acero laminado, mediante uniones soldadas; i/corte, elaboración, montaje y p.p. de soldaduras, cartelas, placas de apoyo, rigidizadores y piezas especiales; despuntes y dos manos de imprimación con pintura de minio de plomo, montaje,	7.777,80
'Ud. Forrado de cubierta de molino, con rastreles atornillados sobre estructura metálica y tabla de pino de 2 cm. clavada con una mano de imprimación xilamon fondo, colocación de chapa de zinc galvanizada en todo su contorno, material y mano de obra.	6.960,00
CERRAJERÍA	1.308,52
'Ud. Suministro y colocación de estructura metálica para sujeción de bastidor y bastidor para motor de molino.	1.308,52
PINTURAS	936,00
'Ud. Esmalte en laca satinado dos manos, color imitación madera sobre estructura de hierro para la cubierta del molino, incluso previo lijado.	936,00
INSTALACIÓN EÓLICA	43.700,40
'Ud. Suministro y colocación de hélices para molino con ejes de tubo estructural de 80x80x3 mm y bastidor de aluminio, galvanizado y lacado.	6.602,40
'Ud. Proyecto especial de elementos mecánico-eléctricos para adaptación de molino manchego en aerogenerador para conexión a red de autoconsumo consistente en: **Alternador de imanes permanentes de 10Kw con salida en trifásico alterna de frecuencia y tensión variable, con sistema de freno	36.414,00

automático con resistencias, incluyendo puente rectificador para alimentar inversores de conexión a la red eléctrica.**Sistema de detección de falta de red para activar el freno.**Estructura seguidor para giro de la cúpula.**Sistema de seguimiento eólico, con veleta y anemómetro para orientar las palas al viento y retirarlas en caso de viento excesivo.**Ingeniería técnica de diseño y desarrollo.

'Ud. Documentación técnica y manual de operación. 540,00

'Ud. Portes de maquinaria eólica y auxiliara para el funcionamiento de la instalación. 84,00

'ud. Ayudas a colocación de rotor de molino. 60,00

TOTAL 60.682,72

Tabla 14. Presupuesto de construcción del molino

Por último se va a proceder a exponer una estimación del coste de las soluciones propuestas tras una breve explicación de las mismas.

- Multiplicadora con relación de transformación 10,72. Determinada a través del estudio conjunto de las otras dos partes que colaboran en el proyecto.
- Rodamiento NUTR 45100, proveedor SKF. Tres unidades de este modelo establecido tras los cálculos realizados para determinar las reacciones en los apoyos.
- Placa metálica transformada en el taller para cargar con la multiplicadora. Diseñada en este trabajo para reubicar este elemento.
- Ruedas de poliamida, proveedor GAYNER. Elegidas para no dañar el raíl sobre el que rueda la cúpula, se necesitarían 5 unidades.

ELEMENTO	PRECIO
Multiplicadora (relación 10,72)	2000
3x NUTR 45100	900
Mecanizado de placa en taller	90
5x Ruedas de poliamida	250
TOTAL	3.240

Tabla 15. Presupuesto soluciones propuestas

Acumulando los recursos utilizados y estas últimas soluciones propuestas el presupuesto total sería de:

Trabajo del alumno	5.700
Trabajo del tutor	1.000
Recursos informáticos	800

Soluciones propuestas	3.240
TOTAL	10.740

Tabla 16. Presupuesto total

CONCLUSIONES

A partir de todo lo expuesto en este proyecto se han obtenido una serie de resultados que permiten concluir que se han cumplido todos los objetivos propuestos al comienzo de este.

Se han actualizado los planos y se han facilitado a la fundación propietaria del molino. Se ha conseguido establecer un método de cálculo que ha permitido extraer resultados determinantes para la toma de decisiones a la hora de escoger soluciones. Se han diseñado y escogido opciones viables desde un punto de vista tanto ingenieril como económico y cuando ha sido necesario se han tenido en cuenta los resultados y conclusiones aportadas por los otros dos grupos encargados del estudio del mismo molino pero de diferentes campos.

La colaboración con las distintas partes involucradas ha aportado un valor añadido al conjunto y a los diferentes miembros involucrados. Ha posibilitado un avance mucho más rápido y especializado de lo que se habría obtenido de haber sido encargado en un solo proyecto. La preparación para el mundo laboral ha sido mayúscula al tratar un elemento existente con problemas de funcionamiento y depender a la vez de otras partes para llegar al resultado final y a una solución aprobada por todos los involucrados.

En términos técnicos se han extraído conocimientos nuevos que no se poseían al inicio de este proyecto. Es el caso de los siguientes

- La acción dinámica del viento aunque puede suponer un incremento en los esfuerzos soportados por las vigas también implica una reducción de las reacciones en los apoyos en el caso de cubiertas.
- La difícil reproducción de imperfecciones de montaje y de los mismos elementos que conforman una estructura a la hora de realizar los cálculos. Y la consiguiente implicación de sobredimensionar las soluciones para cubrir la incertidumbre provocada por estas irregularidades.

En conjunto este proyecto ha conseguido cubrir los objetivos propuestos a la espera de que el molino entre en funcionamiento una vez se implementen las soluciones propuestas. Al mismo tiempo ha servido como instrumento formativo al tener que solucionar las situaciones enfrentadas e implementar los conocimientos adquiridos a lo largo del Grado para un caso real.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Variación del viento con la altura.....	16
Figura 2. Leyenda de los mapas eólicos.....	16
Figura 3. Mapa eólico de Castilla-La Mancha a 80m.....	17
Figura 4. Mapa eólico del casar de la Inesa a 100m.....	17
Figura 5. Mapa eólico del Casar de la Inesa a 60m.....	18
Figura 6. Mapa eólico del Casar de la Inesa a 30m.....	18
Figura 7. Velocidades medias del viento a 80m según los diferentes períodos estacionales.....	19
Figura 8. Panorámica del terreno circundante.....	19
Figura 9. Ilustración Eurocódigo 1 Categoría de terreno II.....	20
Imagen 10. Turbinas de eje horizontal.....	22
Imagen 11. Turbina Darrieus de eje vertical.....	22
Imagen 12. Molino americano.....	23
Figura 13. Molino americano.....	25
Figura 14. Sistema de medida del viento del molino Nolet.....	27
Figura 15. Molino Nolet.....	28
Figura 16. Antiguo molino Ringle Crouch.....	29
Figura 17. Actual molino Ringle Crouch Green.....	30
Figura 18. Aspas del molino. Tensores.....	34
Figura 19. Aspas del molino. Curvatura.....	35
Figura 20. Transmisión en el eje.....	36
Figura 21. Motor de orientación.....	38
Figura 22. Veleta anemómetro.....	39
Figura 23. Alternador.....	40
Figura 24. Curva alternador.....	41
Figura 25. Puntos de funcionamiento de la multiplicadora.....	41
Figura 26. Ubicación alternador y multiplicadora.....	43
Figura 27. Raíl en U.....	44
Figura 28. Tope.....	45
Figura 29. Roldana inicial.....	46
Figura 30. Rodamiento de bolas de transferencia.....	47
Figura 31. Rodamiento de bolas de transferencia.....	47
Figura 32. Eje.....	48
Figura 33. Estructura numerada.....	51
Figura 34. Tablas de cálculo de estructuras. Fuente ETSII.....	52
Figura 35. Puntos de la cúpula con c_{pe} conocido.....	56
Figura 36. Gráfica de valores recomendados de los coeficientes de presión externa para cúpulas.....	56
Figura 37. Distribución del coeficiente de presión externa en la cúpula.....	57
Figura 38. Esquema determinación valor de la x	57
Figura 39. Distribución estimada de presiones según modelo de cuatro aguas.....	58
Figura 40. Distribución de carga en viga de cubierta.....	59
Figura 41. Formulario viga biempotrada carga variable.....	60
Figura 42. Esfuerzos sobre el eje.....	61

Figura 43. Carga sobre viga por cerramiento	74
Figura 44. Carga descompuesta sobre viga por cerramiento	75
Figura 45. Recurso interactivo del programa de cálculo.....	79
Figura 46. Exposición gráfica de resultados del programa de cálculo.....	80
Figura 47. Exposición numérica de resultados del programa de cálculo.....	81
Figura 48. Recurso interactivo en el caso de un apoyo frontal y dos traseros	84
Figura 49. Exposición gráfica de resultados para un apoyo frontal y dos traseros	84
Figura 50. Recurso interactivo en el caso de dos apoyos frontales abiertos y uno trasero	86
Figura 51. Recurso interactivo en el caso de dos frontales próximos y uno trasero.....	87
Figura 52. Distribución definitiva de los apoyos	89
Figura 53. NUTR 45 100.....	90
Figura 54. Propuesta de apoyo con dos roldanas.....	91
Figura 55. Puntos de funcionamiento	92
Figura 56. Multiplicadora seleccionada.....	93
Figura 57. Soporte central	93
Figura 58. Nueva ubicación multiplicadora.....	94
Figura 59. Plano de la nueva ubicación de la multiplicadora	94
Imagen 60. Soporte multiplicadora aislado	95
Figura 61. Soporte multiplicadora en conjunto.....	95
Figura 62. Rueda tope lateral	97
Figura 63. Diagrama de Gantt.....	102

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Categorías del terreno.....	20
Tabla 2 Molino Nolet	27
Tabla 3. Molino Ringle Crouch.....	29
Tabla 4. Aspas Molino de El Casar de la Inesa	35
Tabla 5. Veleta de orientación	38
Tabla 6. Alternador	40
Tabla 7. Reacciones en los apoyos para uno frontal y dos traseros.....	84
Tabla 8. Reacciones en los apoyos para dos frontales abiertos y uno trasero	86
Tabla 9. Reacciones en los apoyos para dos frontales próximos y uno trasero	88
Tabla 10. Propiedades de la roldana. Fuente SKF.....	90
Tabla 11. Reacciones en los apoyos con peso de la multiplicadora.....	96
Tabla 12. Distribución de horas de trabajo	103
Tabla 13. Coste por horas de trabajo	103
Tabla 14. Presupuesto de construcción del molino	104
Tabla 15. Presupuesto soluciones propuestas	105
Tabla 16. Presupuesto total	105

BIBLIOGRAFÍA

Normativa

- [N1] Septiembre 2007, UNE-EN 1991-1-4. "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones de viento."
- [N2] Abril 2010, UNE-EN 1991-1-4: 2007/AC. "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones de viento."
- [N3] Septiembre 2010, UNE-EN 1991-1-4: 2007/A1. "Eurocódigo 1: Acciones en estructuras. Parte 1-4: Acciones de viento."

Proyectos Fin de Carrera

- [P1] Septiembre 2016, Muñoz Gómez, Rubén José. "Energización Eléctrica de un Molino Manchego. Parte II: Adaptación y Parametrización del Rotor Eólico." Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, UPM.
- [P2] Septiembre 2016, Frías Mateo, José Manuel. "Energización Eléctrica de un Molino Manchego. Parte II: Adaptación y Parametrización del Rotor Eólico." Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Minas y Energía, UPM.
- [P3] Septiembre 2013, Azcúnaga Budí, Yolanda. PFC nº 13406031: "Rediseño mecánico de un aerogenerador de eje vertical con dos rodets sincronizados". ETSII UPM.

Formularios

- [F1] Octubre 2006. "Formulario y Tablas de Resistencia de Materiales". Dpto. de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales, ETSII UPM.
- [F2] "Formulario de Vigas Simples". Dpto. de Mecánica Estructural y Construcciones Industriales, Escuela Técnica Superior de Ingenieros Industriales, Universidad Politécnica de Madrid.

Páginas Web

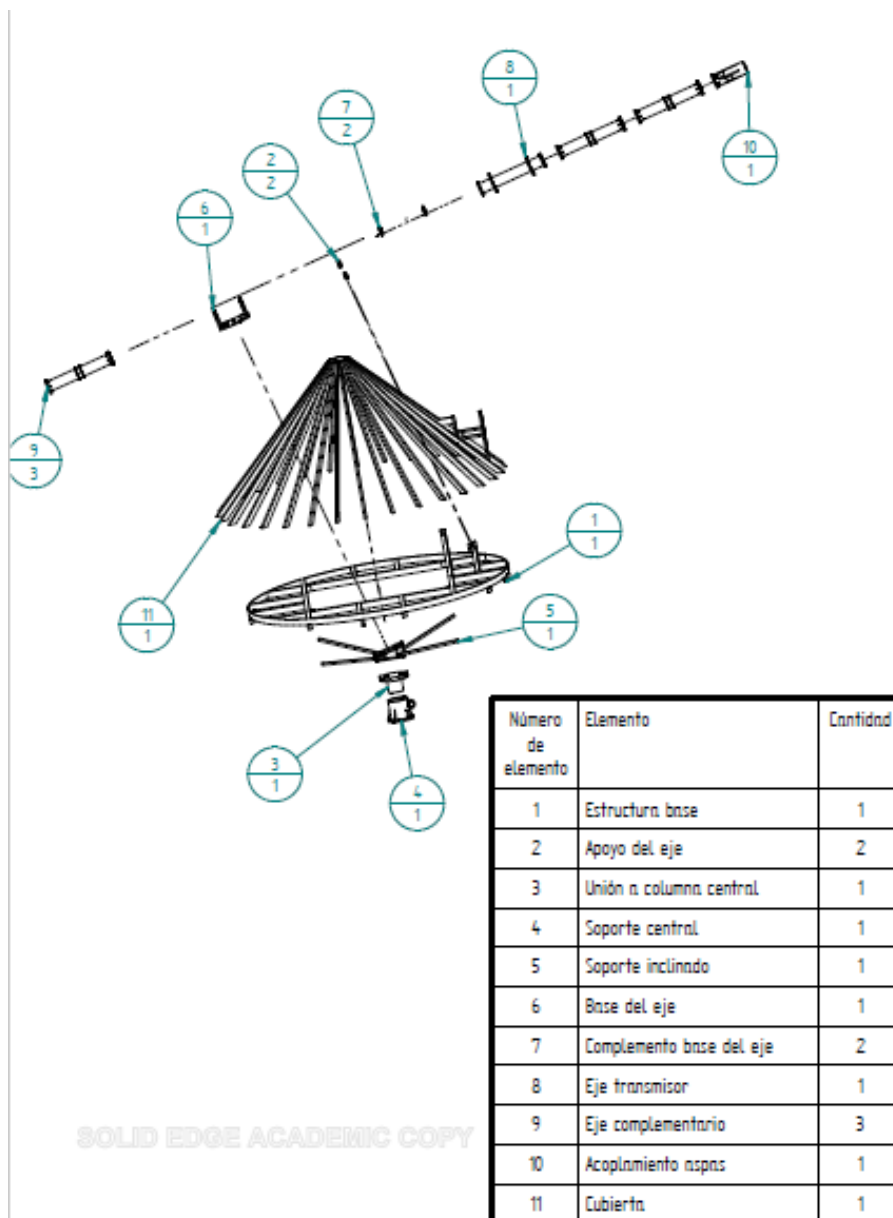
- [W1] Asociación española de normalización y certificación, www.aenor.es.
- [W2] IDAE, www.idae.es
- [W3] SKF, www.skf.com
- [W4] GAYNER, www.gayner.es
- [W5] American Wind Energy Association, www.awea.org
- [W6] Wind Trap, www.windtrap.co.uk
- [W7] European Wind Energy Association, www.ewea.org
- [W8] Windmill World, www.windmillworld.com
- [W9] Nederlandse Molendatabase, www.molendatabase.nl

Documentos facilitados por SIER

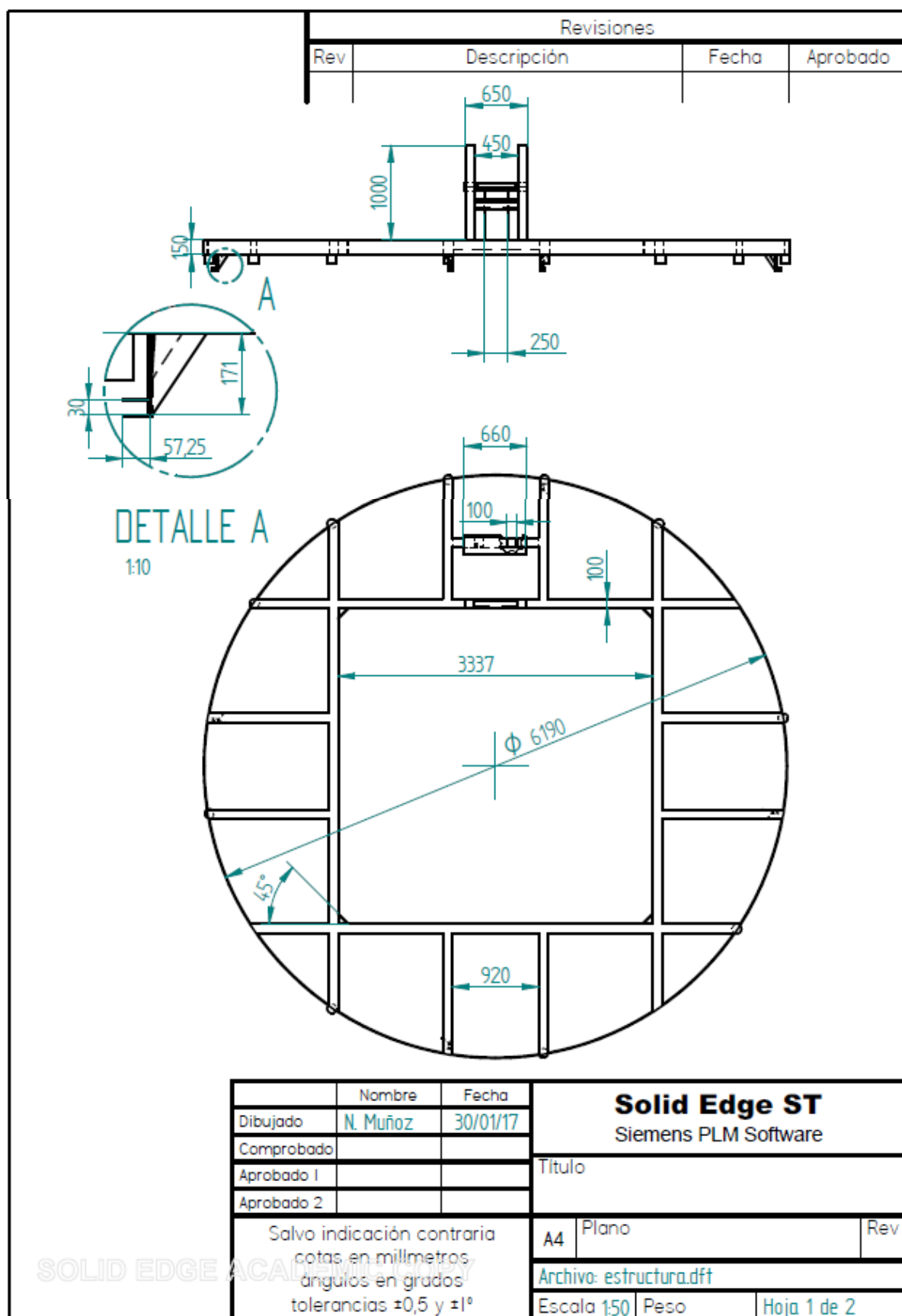
- [D1] "Instructions. Wind monitor 05103" R.M. Young Company, Aero Park Drive, Traverse City, Michigan, USA.
- [D2] Planos de SOLENER, S.A.

ANEXOS

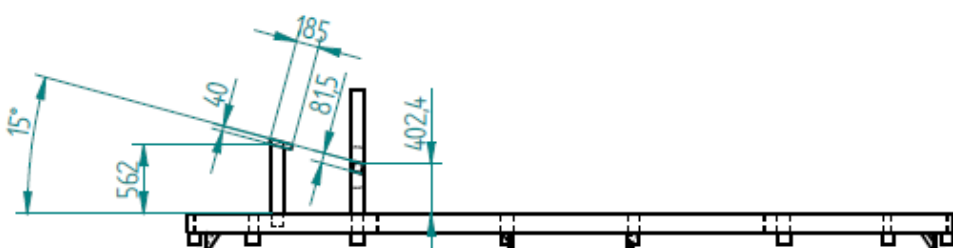
ANEXO I. PLANOS



Estructura del plano base

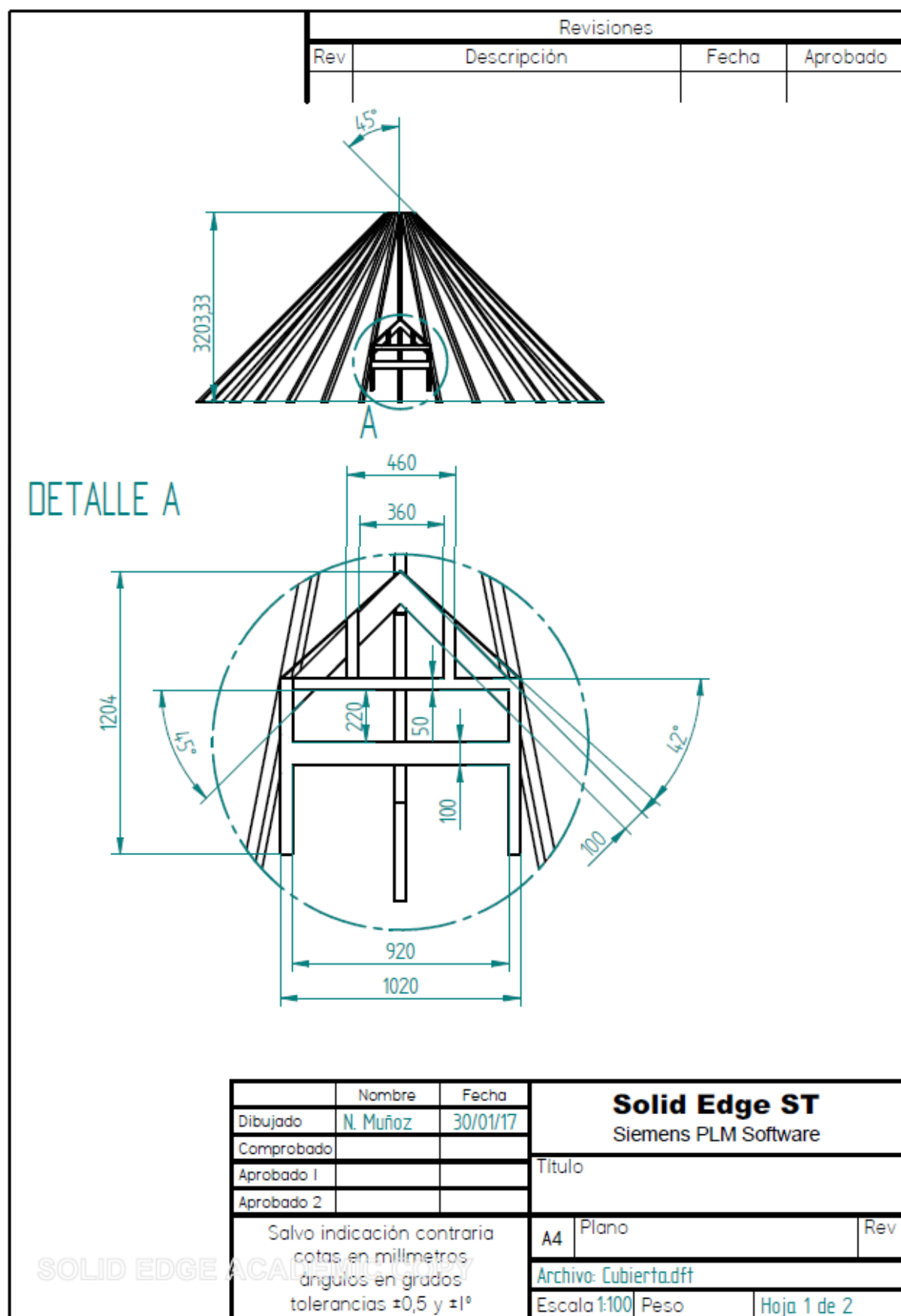


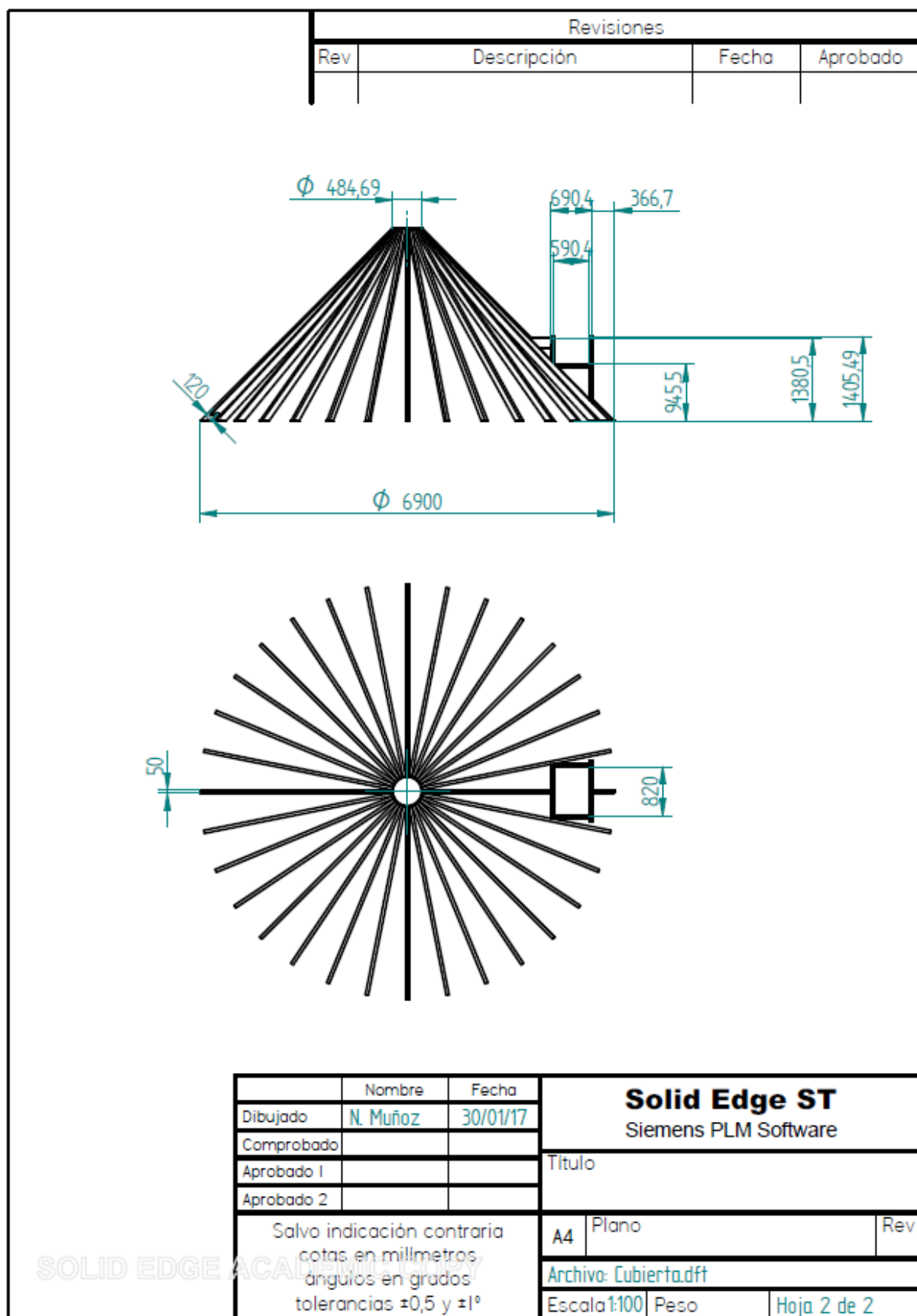
Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



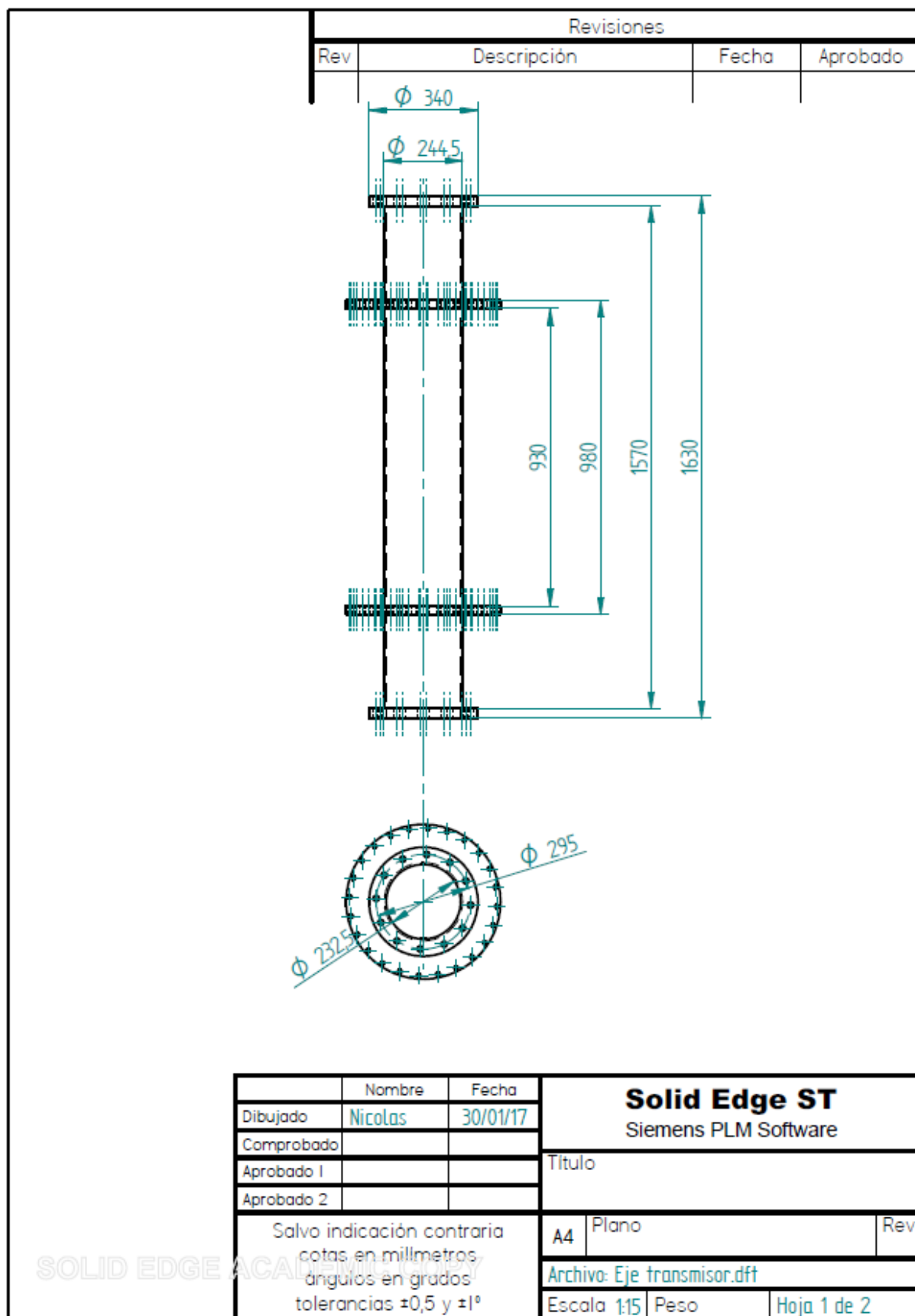
	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	N. Muñoz	30/01/17			
Comprobado			Título		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano	Rev
			Archivo: estructura.dft		
			Escala 1:50	Peso	Hoja 2 de 2

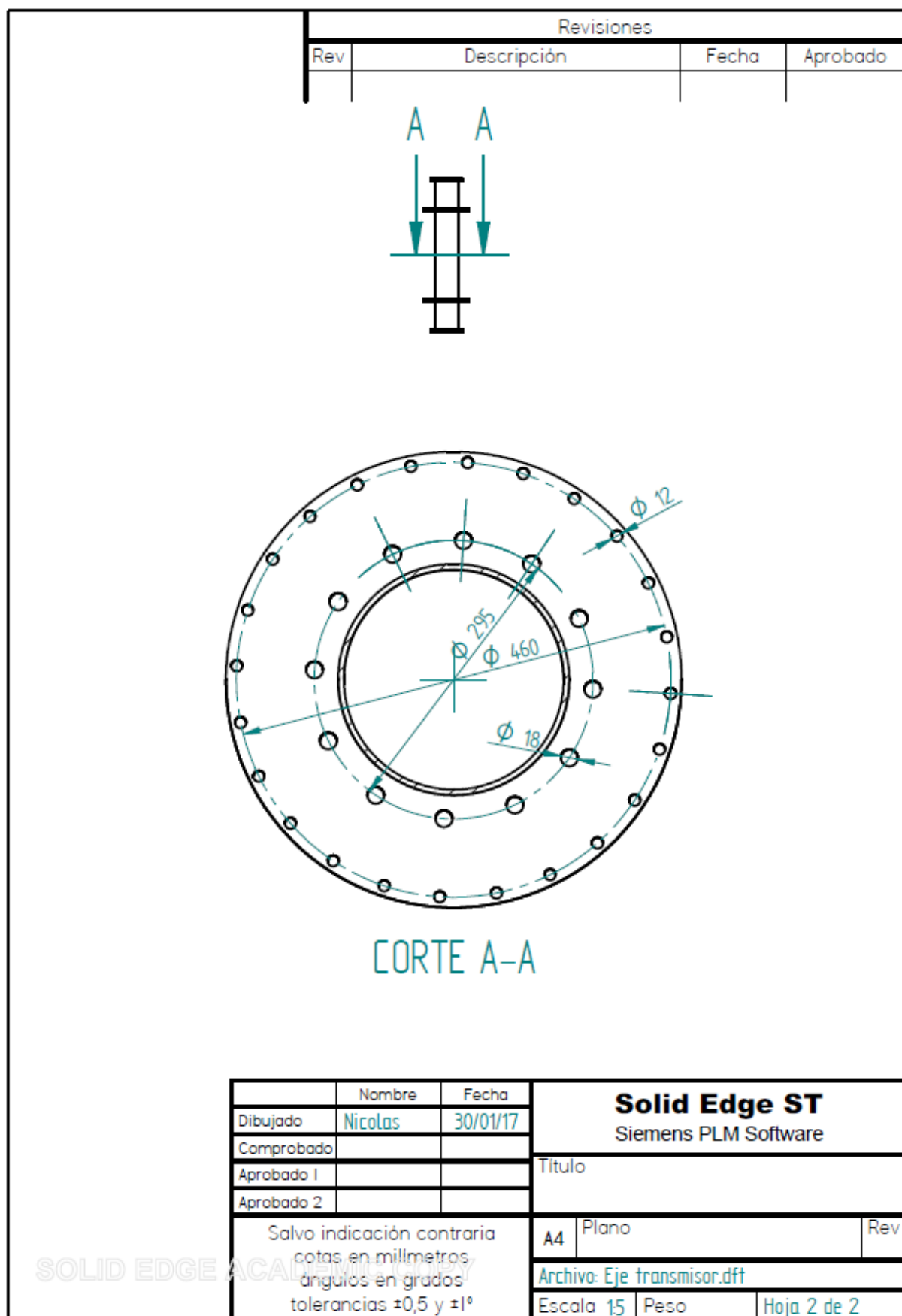
Cubierta



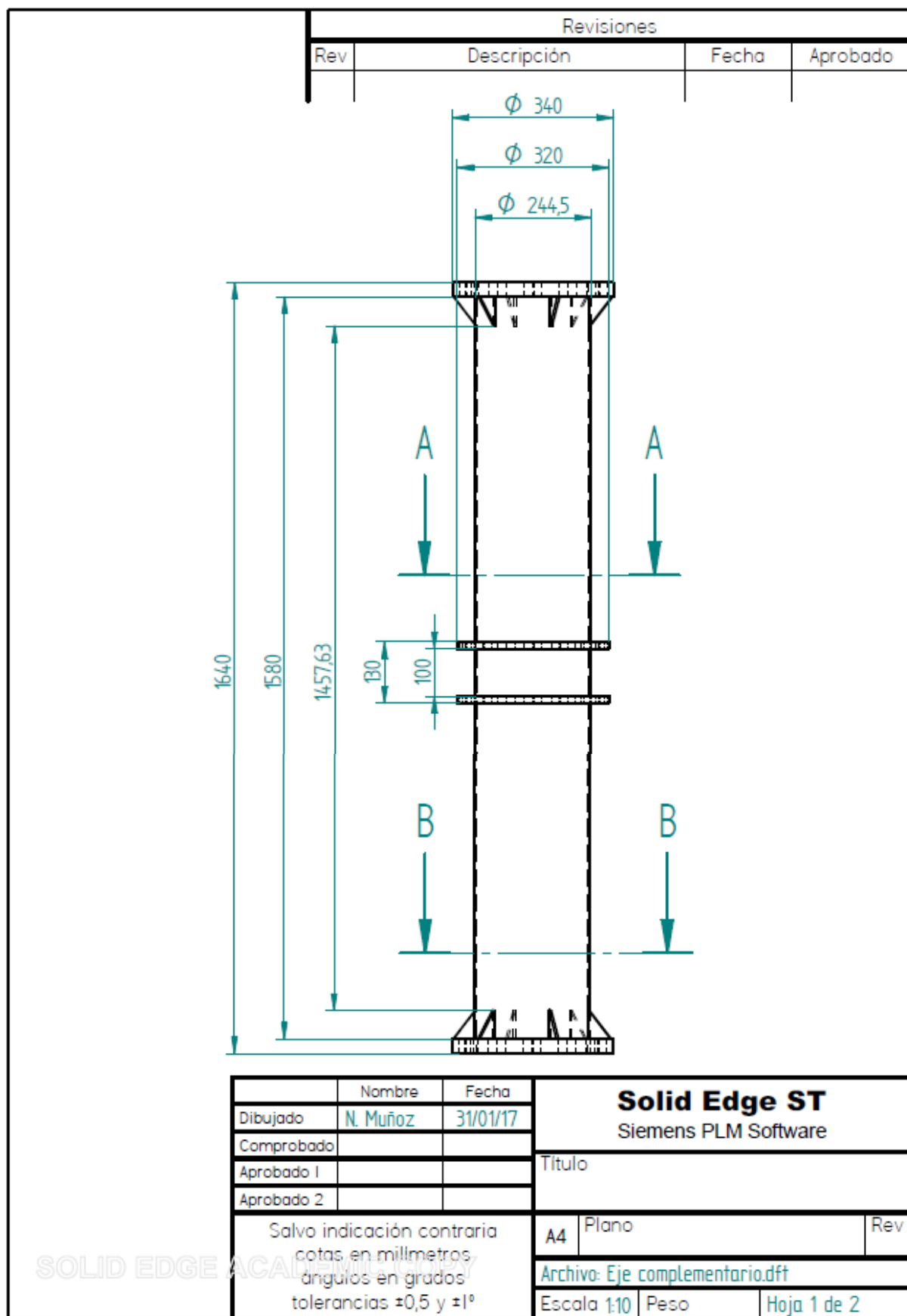


Eje transmisor

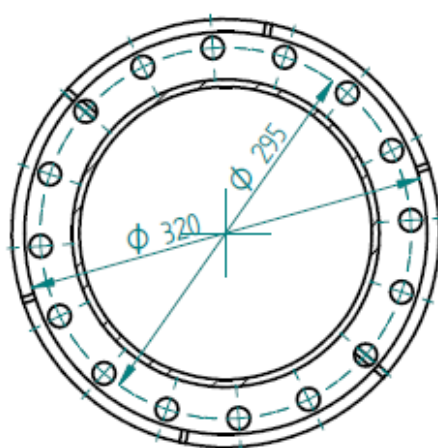




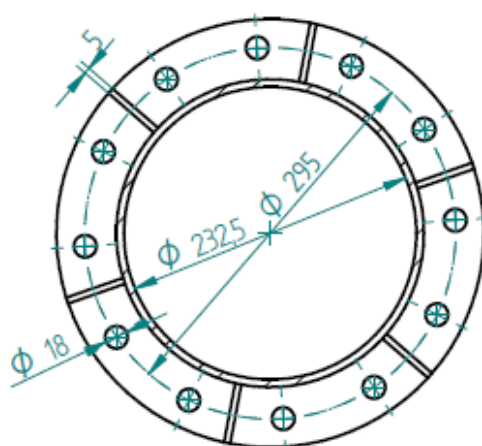
Eje complementario



Revisiones			
Rev	Descripción	Fecha	Aprobado



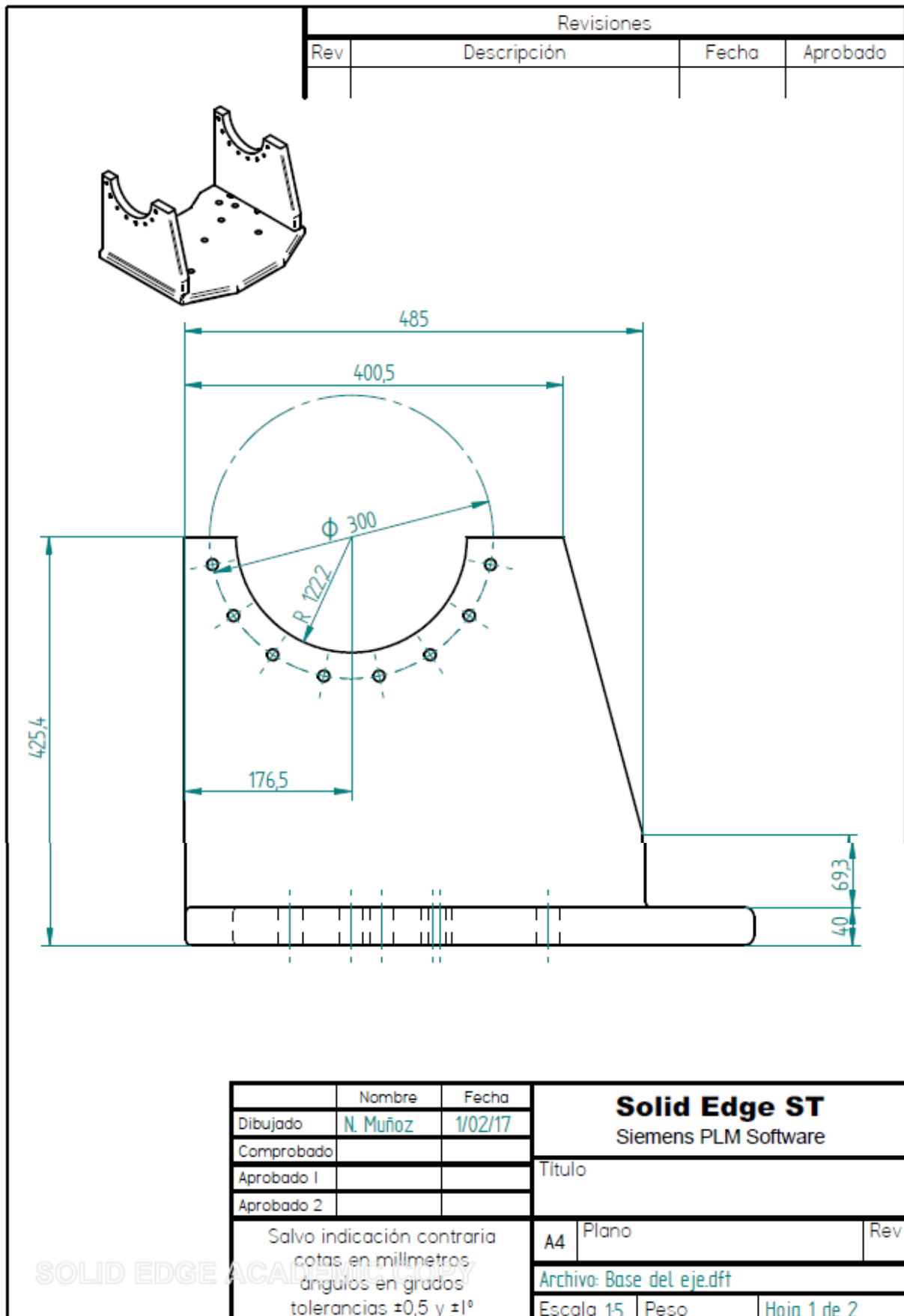
CORTE A-A

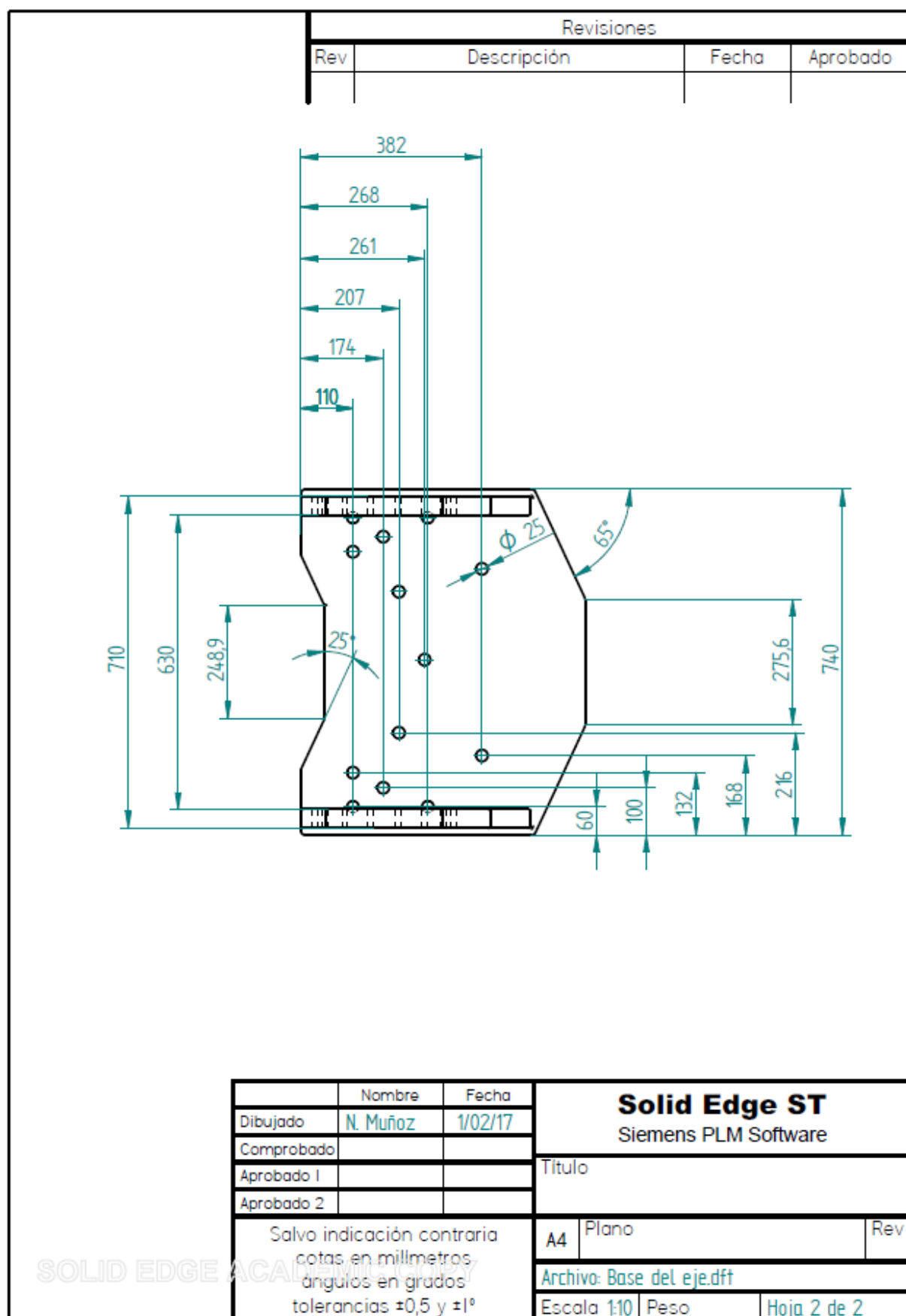


CORTE B-B

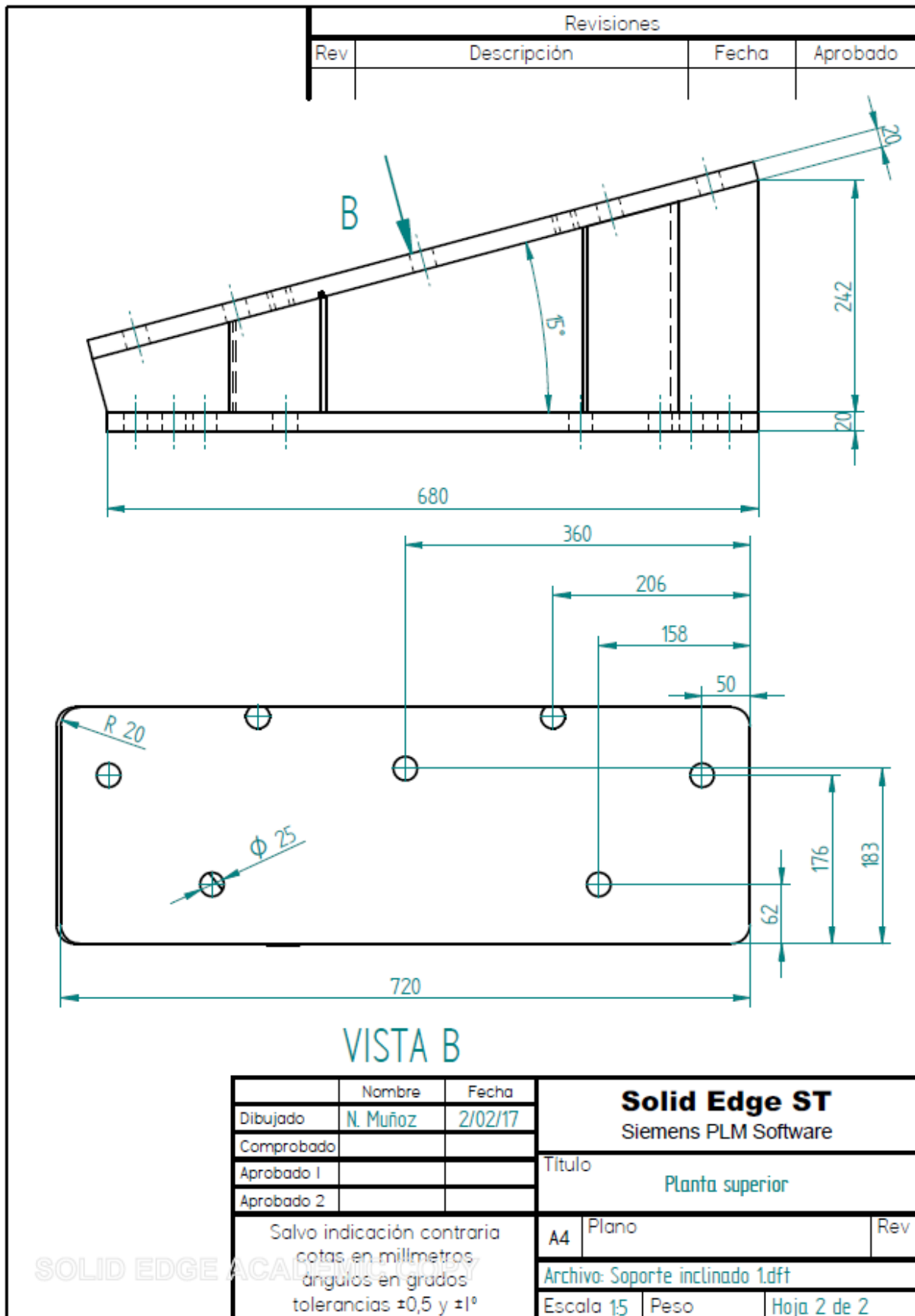
	Nombre	Fecha	Solid Edge ST Siemens PLM Software		
Dibujado	N. Muñoz	31/01/17			
Comprobado			Título		
Aprobado 1					
Aprobado 2					
Salvo indicación contraria cotas en milímetros ángulos en grados tolerancias $\pm 0,5$ y $\pm 1^\circ$			A4	Plano	Rev
			Archivo: Eje complementaria.dft		
			Escala 15	Peso	Hoja 2 de 2

Base del eje

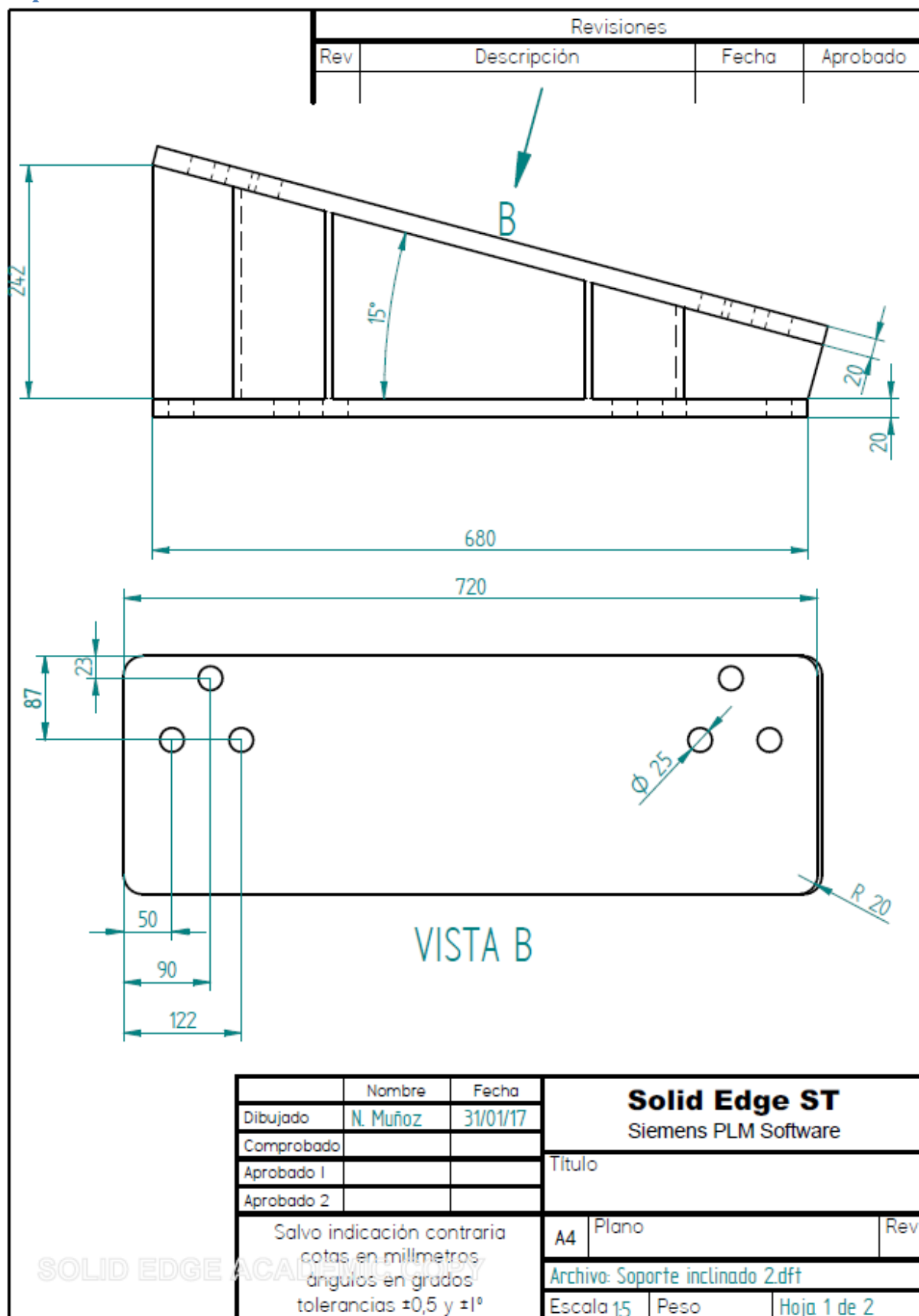




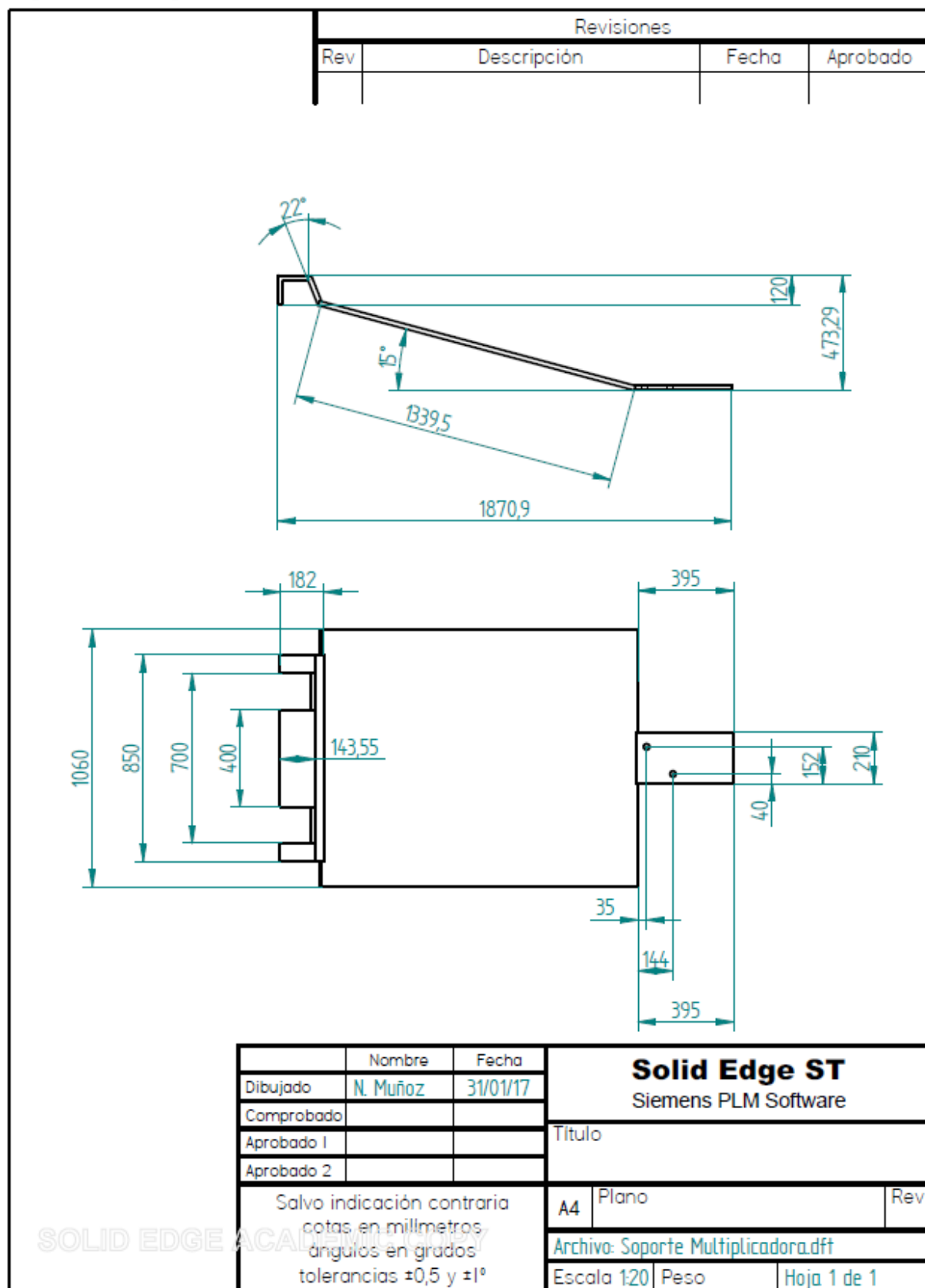
Soporte inclinado 1



Soporte inclinado 2



Soporte multiplicadora



ANEXO II. HOJA DE CÁLCULO PARA LA ACCIÓN DEL VIENTO

Tipo de terreno	Velocidad media vm (m/s)	Densidad del aire ρ (kg/m ³)	Intensidad de turbulencia Iv	Presión a vm qb (Pa)	ce
II	3,4	1,25	0,19	7,225	2,33

Datos	
L (m)	6
Diámetro (m)	6,19
H (m)	6
f (altura de la cúpula) (m)	3,18
Aref	37,14
ze (altura máxima sobre el terreno de la sección)	8,7
Densidad del aire ρ (kg/m ³)	1,25

Cat. Terreno	z0	zmin
0	0,003	1
I	0,01	1
II	0,05	2
III	0,3	5
IV	1	10
2	0,05	2

kr	k1	ov
0,19	1	0,646

Presión de pico qp(ze)
16,83425

Valor recomendado
 Variables introducidas
 Resultado

ANEXO III. PROGRAMA DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA DE MÁQUINAS

Se muestran únicamente los archivos sobre los que se ha trabajado y cuya comprensión era necesaria para el desarrollo de este trabajo.

Mat_Struct_Main_tfg

```
clear all
close all
clc

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%===== DATA =====%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Carpeta = 'data/'; % Version para Mac
% % igsName = 'jueves';
% % filename = 'testerror';
% igsName = 'pruebaviernesMODELOCONJUNTO';
% % filename = 'geomtest1';
% filename = '31dic';
% % ModelFile = 'ReceiverModel1';
% ModelFile = 'StructureModel';
% % ModelFile = [];
%

Carpeta = 'data/'; % Version para Mac
% igsName = 'jueves';
% filename = 'testerror';
igsName = 'stand';
% filename = 'geomtest1';
filename = 'Molino_La_Inesa_v1'; %Archivo en el que se guarda
% ModelFile = 'ReceiverModel1';
ModelFile = 'Molino_La_Inesa'; %Archivo con las coordenadas que hay que
correr
% ModelFile = [];

E = 210e3;
A = 231; % perfiles cuadrados de 40x40x1,5mm
ro = 600; % Kg/m^2
J = 85599.9375;
Iy = 57153.25;
Iz = 57153.25;
G = E/16;

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
```

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% COOR = [x y z NodeType      Cx Cy Cz Cmx Cmy Cmz      ] where
% ----- NodeType == 0 if the point is fixed -
> Cx .. Cmz      indicates the gdl fixed (0) or free (1)
% ----- NodeType == 1 if the point is a rigid node with forces applied -
> Cx .. Cmz indicates the loads
% ----- NodeType == 2 if the point is a rigid node with displacement -
> Cx .. Cmz indicates the displacements
% ----- Cx .. Cmz      indicates the gdl fixed

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%% Load data

igsName2 = cat(2,igsName, '.igs');
igsName3 = cat(2,Carpeta, igsName2);
SetupFileName = cat(2,Carpeta,filename, '.mat');
% for GUI functions
save('aux1.mat', 'SetupFileName')

%% load data
if exist(SetupFileName)
    load(SetupFileName)
    if isempty(ModelFile)==0 % run model file
        COOR = data.COOR;
        BEAMS = data.BEAMS;
        run(ModelFile)
    end
else if isempty(ModelFile)==0
%     igs2COOR
    run(ModelFile)
else
    %% Initialise from .igs igs2COOR

    %% Save created data
    data.COOR = COOR;
    data.BEAMS = BEAMS;
    save(SetupFileName, 'data');
end
end

% fixed=[1 2 3 7 8 9 10 11 12];
%
% xcon=zeros(length(fixed),1);

% % factor de amplificacion para el dibujo de resultados
% ampl=1000;
% forces = zeros(n,1);
% forces(6) = 0.01;

% llamar al programa principal
Mat_Struct

```

Molino_La_Inesa

```

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%===== DATA =====%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
% COOR = [x y z NodeType      Cx Cy Cz Cmx Cmy Cmz      ] where
% ----- NodeType == 0 if the point is fixed                -
% > Cx .. Cmz          indicates the gdl fixed (0) or free (1)
% ----- NodeType == 1 if the point is a rigid node with forces applied -
% > Cx .. Cmz indicates the loads
% ----- NodeType == 2 if the point is a rigid node with displacement  -
% > Cx .. Cmz indicates the displacements
% ----- Cx .. Cmz          indicates the gdl fixed

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Crear la matriz de ceros COOR para rellenar después

COOR = zeros(59,10);

% Nodos exteriores de la estructura circular
% Radio y ángulos de los puntos
n=0;
R=6190/2;      %mm
alpha=0.3310738; %rad
beta=0.4231640167;
gamma=0.3933945;

for i=1:8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2+beta-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2+beta-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=2:8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2+beta/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2+beta/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=3:8:32
    COOR(i,1)=R*cos(alpha/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(alpha/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=4:8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-n*pi/2);
    n=n+1;
end

```



```

end
n=0;

for i=5:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=6:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=7:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=8:+8:32
    COOR(i,1)=R*cos(-alpha/2-beta-gamma/2-n*pi/2);
    COOR(i,2)=R*sin(-alpha/2-beta-gamma/2-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

% Nodos interiores de la estructura circular
% Distancias entre los diferentes puntos
disttotal=3437;
distcentral=1020;
dist=sqrt((disttotal/2)^2+(distcentral/2)^2);
phi=atan((distcentral/2)/(disttotal/2));

for i=33:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)*cos(pi/4-n*pi/2)/(sqrt(2)/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)*sin(pi/4-n*pi/2)/(sqrt(2)/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=34:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)/cos(phi)*cos(phi-n*pi/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)/cos(phi)*sin(phi-n*pi/2);
    n=n+1;
end
n=0;

for i=35:+3:44
    COOR(i,1)=(disttotal/2)/cos(phi)*cos(-phi-n*pi/2);
    COOR(i,2)=(disttotal/2)/cos(phi)*sin(-phi-n*pi/2);
    n=n+1;
end

```

```
n=0;

% Nodos de la estructura de apoyo del eje
%En el plano base

COOR(45,1)=disttotal/2+650;
COOR(45,2)=distcentral/2;

COOR(46,1)=disttotal/2+650;
COOR(46,2)=-distcentral/2;

COOR(47,1)=disttotal/2+650;
COOR(47,2)=350/2;

COOR(48,1)=disttotal/2+650;
COOR(48,2)=-350/2;

COOR(49,1)=disttotal/2;
COOR(49,2)=550/2;

COOR(50,1)=disttotal/2;
COOR(50,2)=-550/2;

%En altura
%Alturas de las estructuras de apoyo del eje
alt1=600;
separacion=660;
alt2=400;
alt3=1050;

%Primera estructura

COOR(51,1)=disttotal/2+650;
COOR(51,2)=separacion/2;
COOR(51,3)=alt1;

COOR(52,1)=disttotal/2+650;
COOR(52,2)=350/2;
COOR(52,3)=alt1;

COOR(53,1)=disttotal/2+650;
COOR(53,2)=-350/2;
COOR(53,3)=alt1;

COOR(54,1)=disttotal/2+650;
COOR(54,2)=-separacion/2;
COOR(54,3)=alt1;

%Segunda estructura

COOR(55,1)=disttotal/2;
COOR(55,2)=550/2;
COOR(55,3)=alt3;

COOR(56,1)=disttotal/2;
COOR(56,2)=-550/2;
COOR(56,3)=alt3;
```

```

        COOR(57,1)=disttotal/2;
        COOR(57,2)=550/2;
        COOR(57,3)=alt2;

        COOR(58,1)=disttotal/2;
        COOR(58,2)=-550/2;
        COOR(58,3)=alt2;

%Nodo de la capirota
altmax=3180;

COOR(59,3)=altmax;

%Creación de vigas
BEAMS = zeros(109,15);

%Vigas periféricas
for i=1:+1:31
    BEAMS(i,1:2) = [...
        i i+1];      %De la 1 a la 31
end

BEAMS(32:34,1:2) = [...
    32 1    %32
    33 34   %33
    34 49]; %34

%Vigas interiores
for i=35:+1:43
    BEAMS(i,1:2) = [...
        i i+1];      %De la 35 a la 43
end

BEAMS(44,1:2) = [...
    44 33]; %44

%Resto de vigas
BEAMS(45:77,1:2) = [...

    33 1    %45
    34 45   %46
    45 3    %47
    35 46   %48
    46 5    %49
    45 47   %50
    47 48   %51
    48 46   %52
    49 50   %53
    50 35   %54
    36 7    %55
    36 9    %56

```

```

37 11 %57
38 13 %58
39 15 %59
39 17 %60
40 19 %61
41 21 %62
42 23 %63
42 25 %64
43 27 %65
44 29 %66
33 31 %67
47 52 %68
48 53 %69
51 52 %70
52 53 %71
53 54 %72
49 57 %73
57 55 %74
50 58 %75
58 56 %76
57 58]; %77

%Vigas de la capirota
for i=1:1:32
BEAMS(77+i,1:2) = [...
i 59]; %De la 78 a la 109
end

%PROPIEDADES
%Propiedades de las vigas del plano base (33-49;53-67)
% Propiedades de los perfiles %%no aparece en tablas
b = 100; h = 150; espesor = 5; %mm
E = 210e3; %MPa
A = 2400; %mm^2
ro = 7833; % Kg/m^3
J = 7906276; % mm^4
Iy = (b*h^3-(b-2*espesor)*(h-2*espesor)^3)/12; %mm^4
Iz = (b^3*h-(b-2*espesor)^3*(h-2*espesor))/12; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(33:49,3:8) = ones(17,1)*[ E A J Iy Iz G];
BEAMS(53:67,3:8) = ones(15,1)*[ E A J Iy Iz G];
BEAMS(33:49,15) = ro;
BEAMS(53:67,15) = ro;

%Propiedades de los perfiles de la estructura de apoyo del eje
%(50-52;68,69; 73-76)
%%Aparece en tablas
b1 = 100; h1 = 100; esp1 = 5; %mm
E = 210e3; %MPa
A1 = 1810; %mm^2
ro1 = 7833; % Kg/m^3
J1 = 4400000; % mm^4
Iy1 = 2660000; %mm^4
Iz1 = 2660000; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

```

```

    %Meterlas en la matriz
    BEAMS(50:52,3:8) = ones(3,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
    BEAMS(68:69,3:8) = ones(2,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
    BEAMS(73:76,3:8) = ones(4,1)*[ E A1 J1 Iy1 Iz1 G];
    BEAMS(50:52,15) = ro1;
    BEAMS(68:69,15) = ro1;
    BEAMS(73:76,15) = ro1;

    %Propiedades pletina circunferencia externa (1-32)
    %no aparece en tablas
    h2=150;b2=10;    %mm
    E = 210e3;        %MPa
    A2 = 1500;        %mm^2
    ro2 = 7833;        % Kg/m^3 PREGUNTAR
    J2 = 50000;        % mm^4
    Iy2 = (b*h^3)/12; %mm^4
    Iz2 = (b^3*h)/12; %mm^4
    G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

    %Meterlas en la matriz
    BEAMS(1:32,3:8) = ones(32,1)*[ E A2 J2 Iy2 Iz2 G];
    BEAMS(1:32,15) = ro2;

    %Propiedades vigas capirote (78-109)
    %Aparece en tablas
    b3 = 50; h3 = 100; esp3 = 3; %mm
    E = 210e3;        %MPa
    A3 = 833;        %mm^2
    ro3 = 7833;        % Kg/m^3
    J3 = 886000;        %mm^4
    Iy3=1050000;        %mm^4
    Iz3=356000;        %mm^4
    G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

    %Meterlas en la matriz
    BEAMS(78:109,3:8) = ones(32,1)*[ E A3 J3 Iy3 Iz3 G];
    BEAMS(78:109,15) = ro3;

    %Propiedades viga 77
    %Aparece en tablas
    b4 = 80; h4 = 80; esp4 = 4; %mm
    E = 210e3;        %MPa
    A4 = 1160;        %mm^2
    ro4 = 7833;        % Kg/m^3
    J4 = 1800000;        %mm^4
    Iy4=1088000;        %mm^4
    Iz4=1088000;        %mm^4
    G = E/(2*(1+0.3)); %MPa

    %Meterlas en la matriz
    BEAMS(77,3:8) = [ E A4 J4 Iy4 Iz4 G];
    BEAMS(77,15) = ro4;

    %Propiedades vigas 70-72
    %Aparece en tablas
    b5 = 185; h5 = 30; esp5 = 5; %mm
    E = 210e3;        %MPa

```

```

A5 = 1160;           %mm^2
ro5 = 7833;          % Kg/m^3
J5 = 1061780;        %mm^4
Iy5 = (b5*h5^3-(b5-2*esp5)*(h5-2*esp5)^3)/12; %mm^4
Iz5 = (b5^3*h5-(b5-2*esp5)^3*(h5-2*esp5))/12; %mm^4
G = E/(2*(1+0.3));   %MPa

%Meterlas en la matriz
BEAMS(70:72,3:8) = ones(3,1)*[ E A5 J5 Iy5 Iz5 G];
BEAMS(70:72,15) = ro5;

%% FUERZAS SOBRE LOS NUDOS

%CARACTERÍSTICAS DE LOS NODOS

COOR(1:59,4)= 1; %En principio todos son nudos rígidos con F=0 aplicadas
sobre ellos

% ACCIÓN DEL EJE SOBRE LOS APOYOS

Ft=5000; F=Ft/2;      % (N) %Peso del eje soportado y dividido entre los
dos nudos
%Reparto de F segun las direcciones de los ejes
COOR(52,4:10)= [1 F*sqrt((sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)
F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) -F*sqrt((1-
(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) 0 0 0];
COOR(53,4:10)= [1 F*sqrt((sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2) -
F*sqrt((1-(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) -F*sqrt((1-
(sin(15*pi/180))^2)/(2-(sin(15*pi/180))^2)) 0 0 0];

% PESO PROPIO DE LA ESTRUCTURA
% Carga constante a lo largo de la viga
% Genera reacciones verticales y momentos por ser nudos rígidos
g=9.81; % m/s^2 % Gravedad
ang=0;
l=0;

for i=1:109
    % Ángulo que forma cada viga con el eje X
    if (COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1))==0 % Para que la
    tangente no de problemas con denominador nulo
        if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2))>0 % Para saber la
        dirección de la viga y determinar el ángulo
            ang=pi/2;
        else
            ang=3*pi/2;
        end
    else
        ang=atan((COOR(BEAMS(i,2),2)-
COOR(BEAMS(i,1),2))/(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)));
        % La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como
        % resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
        % según el caso digo a qué cuadrante pertenece
        % Segundo cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 &&
(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
            ang=ang+pi;
        else

```

```

        % Tercer cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,2),2)-COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 &&
(COOR(BEAMS(i,2),1)-COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
            ang=ang+pi;
        end
    end

end
% Longitud de la viga
l=sqrt((COOR(BEAMS(i,1),1)-
COOR(BEAMS(i,2),1))^2+(COOR(BEAMS(i,1),2)-
COOR(BEAMS(i,2),2))^2+(COOR(BEAMS(i,1),3)-COOR(BEAMS(i,2),3))^2);
%Carga total correspondiente al peso
qpeso=g*BEAMS(i,15)*BEAMS(i,4)*10^(-6); % N/m
% Fuerzas verticales en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),7) = COOR(BEAMS(i,1),7)-qpeso*l/2*10^(-3);
% Fuerzas verticales en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),7) = COOR(BEAMS(i,2),7)-qpeso*l/2*10^(-3);
% Momentos flectores en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),8) = COOR(BEAMS(i,1),8) - sin(ang)*qpeso*l^2*10^(-
6)/12; %
COOR(BEAMS(i,1),9) = COOR(BEAMS(i,1),9) + cos(ang)*qpeso*l^2*10^(-
6)/12; %
% Momentos flectores en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),8) = COOR(BEAMS(i,2),8) + sin(ang)*qpeso*l^2*10^(-
6)/12; %
COOR(BEAMS(i,2),9) = COOR(BEAMS(i,2),9) - cos(ang)*qpeso*l^2*10^(-
6)/12; %
end

% ACCIÓN ADICIONAL SOBRE LAS VIGAS DE LA CUBIERTA

% Como no puedo poner una carga a lo largo de la viga utilizo el
% equivalente sustituyendola por reacciones y momentos en los
extremos.

Lv=sqrt((COOR(4,1))^2+(COOR(59,3))^2)*10^(-3); % m % Longitud de las
vigas de la cúpula en metros para % obtener las
fuerzas y momentos en N y Nm
theta= atan(COOR(59,3)/COOR(4,1)); % Ángulo de cubierta

% ACCIÓN POR PESO DEL CERRAMIENTO

% Carga rampa por la variación del área

g=9.81; % m/s^2 % Gravedad
ro6=1107; % kg/m^3 Densidad de la cubierta sobre la viga, formada por
madera de pino y chapa de Zn
et=22; % mm Espesor total de la cubierta
qcub=g*ro6*et*pi*2*R/32*10^(-6); % N/m % Carga en el extremo inferior de
la viga de cubierta por el cerramiento

for i=78:109 % Se sigue recorriendo por vigas para no cambiar de
criterio

```

```

% Ángulo que forma cada viga con el eje X
ang=atan(COOR(BEAMS(i,1),2)/(COOR(BEAMS(i,1),1)));
% La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como
% resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
% según el caso digo a qué cuadrante pertenece
% Segundo cuadrante
if (COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
    ang=ang+pi;
else
    % Tercer cuadrante
    if (COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) <0
        ang=ang+pi;
    end
end

% Fuerzas verticales en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),7) = COOR(BEAMS(i,1),7) -
7*qcub*Lv/20*cos(theta)*sqrt(1+tan(theta)^2);
% Fuerzas verticales en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),7) = COOR(BEAMS(i,2),7) -
3*qcub*Lv/20*cos(theta)*sqrt(1+tan(theta)^2);
% Momentos flectores en el nodo inicial
COOR(BEAMS(i,1),8) = COOR(BEAMS(i,1),8) +
sin(ang)*qcub*Lv^2/20*cos(theta);
COOR(BEAMS(i,1),9) = COOR(BEAMS(i,1),9) -
cos(ang)*qcub*Lv^2/20*cos(theta);
% Momentos flectores en el nodo final
COOR(BEAMS(i,2),8) = COOR(BEAMS(i,2),8) -
sin(ang)*qcub*Lv^2/30*cos(theta);
COOR(BEAMS(i,2),9) = COOR(BEAMS(i,2),9) +
cos(ang)*qcub*Lv^2/30*cos(theta);
end

% ACCIÓN DEL VIENTO
% Presión cte para el área de cubierta correspondiente a cada viga
% Carga rampa por la variación del área
% Las fuerzas externas se expresan en coordenadas globales

accion=2; % 0 => Sin acción del viento
          % 1 => Viento frontal moderado
          % 2 => Viento lateral fuerte

if accion ==1
    qb=16.834; % Pa %Presión de pico sobre la viga
else
    qb=35;
end

qbL=qb*(pi*2*R*10^(-3)/32); %N/m % Carga en el extremo inferior de la
viga %para multiplicar por un factor
lineal

if accion>=1
    for i=78:109
        % Ángulo que forma cada viga con el eje X
        ang=atan(COOR(BEAMS(i,1),2)/(COOR(BEAMS(i,1),1)));
        % La arcotangente no da el ángulo correcto, solo da como

```



```

% resultado ángulos del primer y cuarto cuadrante,
% para segundo y tercer cuadrante especifico a qué cuadrante
pertenece
    % Segundo cuadrante
    if (COOR(BEAMS(i,1),2)) > 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) < 0
        ang=ang+pi;
    else
        % Tercer cuadrante
        if (COOR(BEAMS(i,1),2)) < 0 && (COOR(BEAMS(i,1),1)) < 0
            ang=ang+pi;
        end
    end
    %La evolución del coeficiente de presión es distinta según sea
barlovento y sotavento
    if cos(ang+(accion-1)*pi/2)>=0      % Barlovento
        cp=(1-cos(ang+(accion-1)*pi/2))*(-2.1)+0.8;      %
coeficiente de presión
    else      % Sotavento
        cp=(1-cos(ang+(accion-1)*pi/2))*0.8-2.1;
        % mv=(-0.5-nv)/Lv;
    end

    % qbL=qbL*accion;      % Para los dos valores establecidos
guarda proporción
    % Reacciones verticales en módulo y coordenadas locales
    R1=qbL*cp*Lv*7/20;
    R2=qbL*cp*Lv*3/20;
    % Momentos en los extremos en coordenadas locales
    M1=qbL*cp*Lv^2/20;
    M2=qbL*cp*Lv^2/30;

    % Transformación a coordenadas globales
    COOR(BEAMS(i,1),5)=COOR(BEAMS(i,1),5)-R1*sin(theta)*cos(ang);
    COOR(BEAMS(i,1),6)=COOR(BEAMS(i,1),6)-R1*sin(theta)*sin(ang);
    COOR(BEAMS(i,1),7)=COOR(BEAMS(i,1),7)-R1*cos(theta);

    COOR(BEAMS(i,1),8)=COOR(BEAMS(i,1),8)+M1*sin(ang);
    COOR(BEAMS(i,1),9)=COOR(BEAMS(i,1),9)-M1*cos(ang);

    COOR(BEAMS(i,2),5)=COOR(BEAMS(i,2),5)-R2*sin(theta)*cos(ang);
    COOR(BEAMS(i,2),6)=COOR(BEAMS(i,2),6)-R2*sin(theta)*sin(ang);
    COOR(BEAMS(i,2),7)=COOR(BEAMS(i,2),7)-R2*cos(theta);

    COOR(BEAMS(i,2),8)=COOR(BEAMS(i,2),8)-M2*sin(ang);
    COOR(BEAMS(i,2),9)=COOR(BEAMS(i,2),9)+M2*cos(ang);

end
end

% ACCION POR EL PESO DE LA MULTIPLICADORA
    % Se aplica entre los cuatro nudos involucrados entre los que se apoya
    % el soporte

Fm=7500;

```

```
for i=34:50
    if i==34 || i==35 || i==49 || i==50
        COOR(i,7)= COOR(i,7)-Fm/4;
    end
end

% COOR(1,4:10)=[0 0 0 0 1 1 1];
% COOR(7,4:10)=[0 0 0 0 1 1 1];
% COOR(20,4:10)=[0 0 0 0 1 1 1];

%% Save data
data.COOR = COOR;
data.BEAMS = BEAMS;
save(SetupFileName, 'data');
```

EstructBeams

```
%%=====
%%===== EstructBeams.m =====
%%=====
% 3D Beam element, loads and displacement calculation

% 22/10/15, modificado para barras articuladas, se eliminan los grados de
libertad
% 14/3/15, error in Local loads fixed
% 1/11/15, check Moment balance: Bego
% 1/12/15, check Moment Balance: corregido, Alex y Bego
% 25/4/16 modificada la visualización de axes por problemas al ejecutar
% estructuras en 2D

figure, clf

%%=====
%%===== Extract data =====
%%=====

% Siempre que se use un modelo determinado por un archivo .m, es necesario
% volver a llamarlo aqui
%SIRA_Press_2D

nnudos = size(COOR,1);
n = nnudos*6;
nvigas = size(BEAMS,1);

%% fixed coordinates, 0 (clamp) and 2 (displacement given)
fixedP = (COOR(:,4)==0 | COOR(:,4)==2); %Crea un vector con 1 para los
nodos fijos o de desplazamiento conocido y 0 el resto(fuerza conocida)
fixedP = find(fixedP); % fixed points %Vector con los índices de los
elementos que son 1 en fixedP, coincidiendo con los de los nodos fijados
fixed = [];
xcon = [];
for i=1:length(fixedP)
    fixedC = [6*fixedP(i)-5:6*fixedP(i)]; %fixed gdl
```

```

xconInput = COOR(fixedP(i),5:10).*[1 1 1 [1 1 1]*pi/180]; % Input in
deg. for displacement given nodes, change to rad!!!
if COOR(fixedP(i),4)==0
    % extract the coordinates
    xconAux = COOR(fixedP(i),5:10);
    % remove the not fixed coordinates
    xconAux = xconAux==1;
    xconAux = find(xconAux);
    fixedC(xconAux) = [];
    % create the fixed coordinates value
    xcon = [xcon, zeros(1,6-length(xconAux))]; %%%!!=====
MODIFICADO AQUI, COORDENADAS FIJAS O LIBRES===== 0=fixed
1=free
else
    xcon = [xcon, COOR(fixedP(i),5:10)];
end

fixed = [fixed, fixedC];
end
% known displacements
x = zeros(n,1);
x(fixed) = xcon;

% free coordinates
free = 1:n;
free(fixed)=[];

%% forces, 1 (rigid node with load)
forcesP = COOR(:,4)==1;
forcesP = find(forcesP);
forces = zeros(n,1);
for i=1:length(forcesP)
    forces(6*forcesP(i)-5:6*forcesP(i)) = COOR(forcesP(i),5:10).*[1 1 1
1000 1000 1000]; % input: N and Nm, Needed: N and Nmm -> change units to
Nmm
end

%%=====
%%=====GRAPHIC=====
%%=====

% cálculo de máximos y mínimos para la figura
xmin=min(COOR(:,1)); xmax=max(COOR(:,1));
ymin=min(COOR(:,2)); ymax=max(COOR(:,2));
zmin=min(COOR(:,3)); zmax=max(COOR(:,3));
XMIN=xmin-(xmax-xmin)*0.2; XMAX=xmax+(xmax-xmin)*0.2; XW=XMAX-XMIN;
YMIN=ymin-(ymax-ymin)*0.2; YMAX=ymax+(ymax-ymin)*0.2; YW=YMAX-YMIN;
ZMIN=zmin-(zmax-zmin)*0.2; ZMAX=zmax+(zmax-zmin)*0.2; ZW=ZMAX-ZMIN;

if YW<XW*0.2 YMIN=YMIN-XW*0.3; YMAX=YMAX+XW*0.3; end
if YW<ZW*0.2 YMIN=YMIN-ZW*0.3; YMAX=YMAX+ZW*0.3; end
if XW<YW*0.2 XMIN=XMIN-YW*0.3; XMAX=XMAX+YW*0.3; end

```

```

if XW<ZW*0.2 XMIN=XMIN-ZW*0.3; XMAX=XMAX+ZW*0.3; end
if ZW<XW*0.2 ZMIN=ZMIN-XW*0.3; ZMAX=ZMAX+XW*0.3; end
if ZW<YW*0.2 ZMIN=ZMIN-YW*0.3; ZMAX=ZMAX+YW*0.3; end

% Dibujo de la estructura sin deformar
axes=[XMIN,XMAX,YMIN,YMAX,ZMIN,ZMAX];
color1='k'; color2=[];
lw=2; % anchura de línea
FAC=1; % escala con la que se dibuja el máximo esfuerzo de cada tipo
% el tercer argumento representa los desplazamientos amplificados (ampl*x)
% la estructura se dibuja con color1 y la deformada con color2
dibstrucBeams(COOR, BEAMS, zeros(n,1), color1, color2, axes, lw)

% inicialización de las matrices de rigidez
K = zeros(n,n);

%%=====
%%%%%%%%%%=====CALCULAR=====%%%%%%%%
%%=====

% Matrix inicialisation
KELEM      = zeros(12,12,nvigas);
RELEM      = zeros(12,12,nvigas);
in         = zeros(nvigas,12);      % DoF of each bar
NewDoFInfo = [];                   % Info of the new DoF (if needed) ->
Point, global DoF number, local DoF number
LVect = zeros(4,3,nvigas);          % local vectors to display
LVectors = zeros(3,3,nvigas);        % local vector components
LVlinesX = [];                      % localvectors organised to display
LVlinesY = [];
LVlinesZ = [];

for k=1:nvigas % parfor
    %% extract data
    BeamIni=BEAMS(k,1); BeamEnd=BEAMS(k,2);
    Xini=COOR(BeamIni,1);
    Yini=COOR(BeamIni,2);
    Zini=COOR(BeamIni,3);
    Xend=COOR(BeamEnd,1);
    Yend=COOR(BeamEnd,2);
    Zend=COOR(BeamEnd,3);
    % BEAMS [P1      1
    %        P2      2
    %        E       3
    %        A       4
    %        J       5
    %        Iy      6
    %        Iz      7
    %        G       8
    %        1-(mx my mz) 9 10 11    1free 0fixed
    %        2-(mx my mz) 12 13 14
    %        ro      15
    E=BEAMS(k,3); A=BEAMS(k,4); J=BEAMS(k,5); Iy=BEAMS(k,6); Iz=BEAMS(k,7);
    G=BEAMS(k,8);

    %% Get the position of the coordinate system of the Beam

```

```

Bvect = [Xend-Xini,Yend-Yini,Zend-Zini];
Bx      = Bvect/norm(Bvect);
if abs(Bx(3))==1
    By = [0 1 0];
else
    By = cross([0 0 1],Bx); By = By/norm(By);
end
Bz      = cross(Bx,By);
% Save the local vectors
Bmiddle = [Xini,Yini,Zini] + Bvect/2;
LVfact   = max(abs([Xini-Xend, Yini-Yend, Zini - Zend]));
LVfact   = 0.2*LVfact;
LVectors(:, :, k) = [Bx; By; Bz];
LVect(:, :, k)     = [Bmiddle + Bx*LVfact; Bmiddle + By*LVfact; Bmiddle +
Bz*LVfact; Bmiddle];

LVlinesX = [LVlinesX % Matrix to display
            LVect(1:3,1,k) LVect(4,1,k)*ones(3,1)];
LVlinesY = [LVlinesY
            LVect(1:3,2,k), LVect(4,2,k)*ones(3,1)];
LVlinesZ = [LVlinesZ
            LVect(1:3,3,k), LVect(4,3,k)*ones(3,1)];

% LOCAL VECTOR cosines, Vector uy always belongs to HORIZONTAL PLANE,
and ux along the main direction of the beam
CXx  = Bx(1); CYx  = Bx(2);  CZx  = Bx(3);
CXy  = By(1); CYy  = By(2);  CZy  = By(3);
CXz  = Bz(1); CYz  = Bz(2);  CZz  = Bz(3);

L(k)  = sqrt((Yend-Yini)^2 + (Xend-Xini)^2 + (Zend-Zini)^2);

%% Extract LOCAL stiffness matrix of the element, and the rotation
matrix
[KG, RR] =
matrizKG_3D(E,A,L(k),J,Iy,Iz,G,CXx,CYx,CZx,CXy,CYy,CZy,CXz,CYz,CZz);
KTEST(:, :, k) = KG;

%% Matrix K assembly
in(k, :) = [(BEAMS(k,1)*6-5):(BEAMS(k,1)*6), (BEAMS(k,2)*6-
5):(BEAMS(k,2)*6)];
inLocal = [1:12]; % vector that stores the number of local DoF that are
going to be taken into account

% Create new DoF to allow a "bar" behaviour
SpecialNodes1 = BEAMS(k,9:11)==1;
SpecialNodes1 = find(SpecialNodes1);
SpecialNodes2 = BEAMS(k,12:14)==1;
SpecialNodes2 = find(SpecialNodes2);

% set KG, remove the contributions to the selected moments, IN GLOBAL
COORDINATES!!! the program is not prepared to remove moments in local
coordinates
if isempty(SpecialNodes1)==0
    % recorremos cada grado de libertad

```

```

for r=1:length(SpecialNodes1)
    % fix the DoF
    LocalDoF = 3 + SpecialNodes1(r);
    GlobalDoF = BEAMS(k,1)*6 - 6 + LocalDoF;
    % ask if the selected global DoF is already fixed
    if isempty(find(fixed==GlobalDoF))
        fixed = [fixed, GlobalDoF];
        % delete the free coordinate
        delfree = find(free==GlobalDoF);
        free(delfree) = [];
    end
    % delete the global stiffness matrix components
    DelDoF = find(inLocal==LocalDoF);
    KG(DelDoF,:) = [];
    KG(:,DelDoF) = [];
    % here are the index (DoF) that are going to be taken into
account
    inLocal(DelDoF) = []; % eliminate the index of the deleted DoF

end
end
if isempty(SpecialNodes2)==0
    for r=1:length(SpecialNodes2)
        % fix the DoF
        LocalDoF = 9 + SpecialNodes2(r);
        GlobalDoF = BEAMS(k,2)*6 - 6 + LocalDoF -6;
        % ask if the selected global DoF is already fixed
        if isempty(find(fixed==GlobalDoF))
            fixed = [fixed, GlobalDoF];
            % delete the free coordinate
            delfree = find(free==GlobalDoF);
            free(delfree) = [];
        end
        % delete the global stiffness matrix components
        DelDoF = find(inLocal==LocalDoF);
        KG(DelDoF,:) = [];
        KG(:,DelDoF) = [];
        % here are the index (DoF) that are going to be taken into
account
        inLocal(DelDoF) = []; % eliminate the index of the deleted DoF

    end
end

%% Eliminate the selected DoF (OLD)
% % Beams ( 8///// 9 10 11, 12 13 14) 1-(mx my mz) 2-(mx my mz) 1 =
free, 0 = fixed
% DelDoF1 = COOR(BeamIni,11:13)==1; DelDoF1=find(DelDoF1);
% if isempty(DelDoF1)==0
%     for m=1:length(DelDoF1)
%         DelVar = DelDoF1(m) + 6*BeamIni - 3;
%         DelVar = find(free==DelVar);
%         free(DelVar) = [];
%         % Delete the components in the element stiffness matrix
%         KG(DelDoF1(m)+3,:) = zeros(12,1);
%         KG(:,DelDoF1(m)+3) = zeros(1,12);
%     end
% end
% DelDoF2 = COOR(BeamEnd,11:13)==1; DelDoF2=find(DelDoF2);
% if isempty(DelDoF2)==0
%     for m=1:length(DelDoF2)

```

```
%
    DelVar = DelDoF2(m) + 6*BeamEnd - 3;
%
    DelVar = find(free==DelVar);
%
    free(DelVar) = [];
%
    % Delete the components in the element stiffness matrix
%
    KG(DelDoF2(m)+9,:) = zeros(12,1);
%
    KG(:,DelDoF2(m)+9) = zeros(1,12);
%
    end
%
end
%
=====
%
    SpecialNodes1 = BEAMS(k,9:11)==1;
%
    SpecialNodes1 = find(SpecialNodes1);
%
    SpecialNodes2 = BEAMS(k,12:14)==1;
%
    SpecialNodes2 = find(SpecialNodes2);
%
    % set KG, remove the contributions to the selected moments, IN GLOBAL
COORDINATES!!! the program is not prepared to remove moments in local
coordinates
%
    if isempty(SpecialNodes1)==0
%
        Kaux = zeros(length(SpecialNodes1),12);
%
        for r=1:length(SpecialNodes1)
%
            Kaux(r,SpecialNodes1(r)+3) = 1; % the component of the
removednode must be 1, otherwise the matrix is singular
%
        end
%
        KG(SpecialNodes1+3,:) = zeros(12,1);
%
        KG(:,SpecialNodes1+3) = zeros(1,12); %% MODIFY!!!!
%
    end
%
    if isempty(SpecialNodes2)==0
%
        Kaux = zeros(length(SpecialNodes2),12);
%
        for r=1:length(SpecialNodes2)
%
            Kaux(r,SpecialNodes2(r)+9) = 1;
%
        end
%
        KG(SpecialNodes2+9,:) = zeros(12,1);
%
        KG(:,SpecialNodes2+9) = zeros(1,12);
%
    end
%
=====

    K(in(k,inLocal),in(k,inLocal)) = K(in(k,inLocal),in(k,inLocal)) + KG;
% Saving each matrix
    KELEM(inLocal,inLocal,k) = KG;
    RELEM(:, :, k) = RR;
end

%%=====%%
%%System solving =====%%
%%=====%%

x(free) = (K(free,free))\((forces(free) - (K(free,fixed))*x(fixed));
DefMax = max(abs(x))
%%=====%%
%%Load calculation =====%%
%%=====%%
% Loads in N, Moments in Nmm

%% Calculate loads
ESF = zeros(12,nvigas);
loads = zeros(12,nvigas);
for k=1:nvigas
```

```
% Loads in Global coordinates
loads(:,k) = KELEM(:, :, k)*x(in(k, :));
% change to local coordinates
ESF(:, k) = RELEM(:, :, k)*loads(:, k); % Fx Fy Fz Mx My Mz (INVERTED?!!)
end

% highest loads:
for i=1:nvigas
    ESFsum(i) = ones(1,3)*ESF(1:3,i);
    Msum(i) = ones(1,3)*ESF(4:6,i);
end
[valf, vigaf] = max(ESFsum)
[valm, vigam] = max(Msum)

% disp(['vector de fuerzas en el punto A (N y Nmm) =
', num2str(loads(1:6,1))'])
% disp(['vector de fuerzas en el punto B (N y Nmm) =
', num2str(loads(7:12,6))'])

%% Check the resultant reaction forces
ind1 = []; ind2 = [];
for l=1:length(fixedP)
    ind1 = [ind1, find(BEAMS(:,1)==fixedP(l))'];
    ind2 = [ind2, find(BEAMS(:,2)==fixedP(l))'];
end
%first node loads
try
    SLoads1 = loads(1:3, ind1);
catch
    SLoads1 = [0; 0; 0];
end
NL1 = size(SLoads1,2);
%second node loads
try
    SLoads2 = loads(7:9, ind2);
catch
    SLoads2 = [0; 0; 0];
end
NL2 = size(SLoads2,2);
% Loads sum
ForceEq = SLoads1*ones(NL1,1) + SLoads2*ones(NL2,1)

%%=====%%
%%%%%%%%%%===== Moment balance =====%%%%%%%%%%
%%=====%%

%loads para tener las fuerzas de los puntos, no de las vigas
ploads=zeros(nnudos,6);

for i=1:nvigas
    ploads(BEAMS(i,1), :) = ploads(BEAMS(i,1), :) + loads(1:6,i)';
    ploads(BEAMS(i,2), :) = ploads(BEAMS(i,2), :) + loads(7:12,i)';
end

% momentos debidos a fx fy fz de todos los Puntos
```



```

mr0=zeros(nnudos,3);
for i=1:nnudos
    mr0(i,:)=cross(COOR(i,1:3)-COOR(1,1:3),ploads(i,1:3));
end
MFsuma = mr0'*ones(nnudos,1);
MSuma = ones(1,nnudos)*ploads(:,4:6);

%Taraaaaaaaaaan
MR = MFsuma + MSuma

%%=====%%
%%Stress calculation=====%%
%%=====%%

% Stress calculation, only because of Fx, My and Mz (torsion and shear are
not taken into account) -> modify for asymmetric 3d properties
% Stress = ESF([1 2 3 11 12],:);
% Stress = Stress.*([1/A; 1/A; 1/A; 45/(2*I); 45/(2*I)]*ones(1,nvigas));

% % comprobacion: suma de esfuerzos nula en barra 1:
% disp('comprobacion, momentos de la barra 1 respecto al punto 1 deben ser
nulos')
% for i=1:nvigas
%     disp('Barra '), i
%     mz = ESF(6,i)+ESF(12,i)+L(i)*ESF(8,i)
%     my = ESF(5,i)+ESF(11,i)-L(i)*ESF(9,i)
%     sx = ESF(1,i)+ESF(7,i)
%     sy = ESF(2,i)+ESF(8,i)
% end

%%=====%%
%%Display deformada=====%%
%%=====%%

% Dibujo de la estructura deformada
% no se modifica COOR sino que se le pasan los desplazamientos amplificados
color1='k'; color2='r';
ampl = 8e0;
clf
dibstrucBeams(COOR, BEAMS, x*ampl, color1, color2, axes, lw)
% draw the local axis
line(LVlinesX', LVlinesY', LVlinesZ', 'Color','b', 'LineWidth',4);
axis equal

% %
=====%%
% % %%Stress calculation===== Receiver Results
=====%%
% %
=====%%
% disp('Done')
% Pstart = 13;

```

```
% dispX = x(6*Pstart+1:6:end); disp(['x max (mm) =',num2str(max(abs(dispx))))]
% dispY = x(6*Pstart+2:6:end); disp(['y max (mm)=',num2str(max(abs(dispy))))]
% dispZ = x(6*Pstart+3:6:end); disp(['z max (mm)=',num2str(max(abs(dispz))))]
% ThetaX =x(6*Pstart+4:6:end); disp(['ThetaX max (deg)=',num2str(max(abs(ThetaX))*180/pi)])
% ThetaY =x(6*Pstart+5:6:end); disp(['ThetaY max (deg)=',num2str(max(abs(ThetaY))*180/pi)])
% ThetaZ =x(6*Pstart+6:6:end); disp(['ThetaZ max (deg)=',num2str(max(abs(ThetaZ))*180/pi)])
% DispYbell = max(abs(ThetaY))*TorsionRadius; disp(['Displacement in X due to torsion (mm)= ',num2str(DispYbell)])

% displacements matrix

xDisp = [];

for i=1:nnudos

    xDisp = [xDisp; x(i*6-5:i*6-3)];

end;

disp(['Deformación máxima: ',num2str(max(xDisp))])

% max load

[Nmax, BeamNmax] = max(ESF(1,:));

PointsNmax = BEAMS(BeamNmax,1:2);

disp(['Carga axial máxima ', num2str(Nmax),' en los puntos: ', num2str(PointsNmax)])

% Mostrar reacciones en los apoyos

for i=1:32
    if COOR(i,4:5)==[0 0]
        disp(i)
        ploads(i,1:3)

    end
end


% Loads in specific bars
% disp(['Carga barra 1 '])
%ESF(:,1)
%disp(['Carga barra 2 '])
%ESF(:,2)
%disp(['Carga barra 3 '])
%ESF(:,3)
%disp(['Carga barra 4 '])
%ESF(:,4)
%disp(['Carga barra 5 '])
```

```
%ESF(:,5)
%disp(['Carga barra 6 '])
%ESF(:,6)
%disp(['Carga barra 7 '])
%ESF(:,7)
%disp(['Carga barra 8 '])
%ESF(:,8)

% disp(['vector de fuerzas en el punto A (N y Nmm) =
',num2str(loads(1:6,1))])
% disp(['vector de fuerzas en el punto B (N y Nmm) =
',num2str(loads(7:12,6))])

%%%%% END
```

ANEXO IV. PRESUPUESTO GLOBAL DEL MOLINO

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.		FECHA: 05 / 10 / 16			
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral		PÁGINA: 1			

PRESUPUESTO DE OBRA										
Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe						
1	OBRA CIVIL									
1.1	ACONDICIONAMIENTO DEL TERRENO									
1.1.1	m3. Excavación en zanjas, en terrenos compactos, por medios mecánicos, con extracción de tierras a los bordes, sin carga ni transporte al vertedero y con p.p. de medios auxiliares.									
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
			1,00	19,35	0,80	1,00	15,48			
							15,48		14,50	224,46
1.1.2	Ud. Vaciado de tierras en interior de molino para centro de transformación y carga sobre camión incluso transporte y vertido dentro de la misma finca.									
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
			1,00	-	-	-	1,00			
							1,00		413,00	413,00
1.1	Total subcapítulo ACONDICIONAMIENTO DE									637,46
1.2	FOSOS SUELO CENTRO TRANSF.									
1.2.1	ud. Ejecución de canaletas en interior de centro de transformación mediante picado de terreno natural, extracción de tierras, ejecución de muros de 1/2 pie tosco, rellenos para solera, recibido ce cercos de rejillas, enfoscados interiores y remates.									
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
			1,00	-	-	-	1,00			
							1,00		2.170,60	2.170,60
1.2	Total subcapítulo FOSOS SUELO CENTRO TR									2.170,60
1.3	CIMENTACIONES									
1.3.1	m3. Hormigón armado HA-25 N/mm2, consistencia plástica, Tmáx.40 mm., para ambiente normal, elaborado en central en relleno de zapatas y zanjas de cimentación, incluso armadura (40 kg/m3.), vertido por medios manuales, vibrado y colocación. Según normas NTE-CSZ , EHE-08 y CTE-SE-C.									
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
			1,00	19,35	0,80	1,00	15,48			
							15,48		150,00	2.322,00
1.3.2	m2. Solera de hormigón de 15 cm. de espesor, realizada									

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16	
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 2	

Applus®


RECONOCIMIENTO DE CALIDAD

ISO 9001

Edificación

CONSTRUCCIÓN

Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe																												
	con hormigón HA-25 N/mm2, Tmáx.20 mm., elaborado en obra, i/vertido, colocación y armado con mallazo 15x15x6, p.p. de juntas, aserrado de las mismas y fratasado. Según NTE-RSS y EHE-08.																															
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>3,14</td><td>9,50</td><td>-</td><td>29,83</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>29,83</td><td></td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	3,14	9,50	-	29,83							29,83			17,00	507,11							
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																										
	1,00	3,14	9,50	-	29,83																											
					29,83																											
1.3.3	m2. Encachado de piedra caliza 40/80 de 20 cm. de espesor en sub-base de solera, i/extendido y compactado con pisón.																															
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>3,14</td><td>9,50</td><td>-</td><td>29,83</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>29,83</td><td></td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	3,14	9,50	-	29,83							29,83			8,00	238,64							
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																										
	1,00	3,14	9,50	-	29,83																											
					29,83																											
1.3	Total subcapítulo CIMENTACIONES					3.067,75																										
1.4	ESTRUCTURAS																															
1.4.1	m2. Forjado 25+5 cm. formado a base de semiviguetas de hormigón pretensado, separadas 70 cm. entre ejes, bovedilla cerámica de 60x25x25 cm. y capa de compresión de 5 cm., de hormigón HA-25/P/20/I, elaborado en central, i/armadura (3,00 kg/m2), terminado. Según normas NTE, EHE-08 y CTE-SE-AE.																															
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>suelo p.1ª</td><td>1,00</td><td>3,14</td><td>9,50</td><td>-</td><td>29,83</td><td></td></tr><tr><td>suelo p.2ª</td><td>1,00</td><td>3,14</td><td>9,50</td><td>-</td><td>29,83</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>59,66</td><td></td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	suelo p.1ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83		suelo p.2ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83							59,66			80,00	4.772,80
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																										
suelo p.1ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83																											
suelo p.2ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83																											
					59,66																											
1.4.2	ud. Escalera compuesta por losa de hormigón armado HA-25 y acero B-500-S de y peldaños de hormigón en masa. Apoyo en forjado totalmente terminada según EHE-08 y CTE. Medición por unidad de escalera																															
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>planta 1ª-planta 2ª</td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td></td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	planta 1ª-planta 2ª	1,00	-	-	-	1,00							1,00			860,00	860,00							
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																										
planta 1ª-planta 2ª	1,00	-	-	-	1,00																											
					1,00																											
1.4.3	ud. Escalera escamoteable para techo, desplegable en dos tramos con cajón y tapa de pino nórdico de 120x70x22 cm. para una altura máxima de 3,00 m. i/recibido de albañilería y montante en obra, (sin incluir apertura de hueco en forjado).																															
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>p.baja-p.1ª</td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td></td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	p.baja-p.1ª	1,00	-	-	-	1,00							1,00			480,00	480,00							
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																										
p.baja-p.1ª	1,00	-	-	-	1,00																											
					1,00																											

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.				FECHA: 05 / 10 / 16		
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral				PÁGINA: 3		
								
Clave	Descripción	Medición			Precio	Importe		
1.4.4	Ud. Suministro , curvado, colocación , soldadura y recibido de obra de perfil UPN-80 circular colocado en la parte superior del molino para el giro de la cubierta.							
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
			1,00	-	-	-	1,00	
							1,00	912,22
								912,22
1.4.5	Ud. Suministro y colocación de dos vigas IPN 160 para apoyo de estructura de sustentación del motor eólico del molino.							
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
			1,00	-	-	-	1,00	
							1,00	532,30
								532,30
1.4.6	Ud. Trabajos de albañilería en ejecución de cajón para escalera escamoteable , corte de viga y montaje de cajón.							
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
			1,00	-	-	-	1,00	
							1,00	80,00
								80,00
1.4	Total subcapítulo ESTRUCTURAS							7.637,32
1.5	CUBIERTAS							
1.5.1	Ud. Estructura metálica para cubierta compuesta por tubo estructural y pletina de acero laminado, mediante uniones soldadas; i/corte, elaboración, montaje y p.p. de soldaduras, cartelas, placas de apoyo, rigidizadores y piezas especiales; despuntes y dos manos de imprimación con pintura de minio de plomo, montado,							
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
			1,00	-	-	-	1,00	
							1,00	7.777,80
								7.777,80
1.5.2	Ud. Forrado de cubierta de molino, con rastreles atornillados sobre estructura metálica y tabla de pino de 2 cm. clavada con una mano de imprimación xilamon fondo, colocación de chapa de zinc galvanizada en todo su contorno, material y mano de obra.							
		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
			1,00	-	-	-	1,00	
							1,00	6.960,00
								6.960,00
1.5	Total subcapítulo CUBIERTAS							14.737,80
1.6	CERRAMIENTOS, DIVISIONES, CHAPADOS							

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16	
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 4	

Applus+

RECONOCIMIENTO DE COMPETENCIA PROFESIONAL

ISO 9001

EN 10607

CONSTRUCCIÓN

Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe														
1.6.1	m2. Fábrica de ladrillo perforado tosco de 24x11,5x10 cm. de 1 pie de espesor en interior, recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-5, preparado en central y suministrado a pie de obra, para revestir, i/replanteo, nivelación y aplomado, p.p. de enjarjes, mermas, roturas, humedecido de las piezas, rejuntado, cargaderos, mochetas, plaquetas, esquinas, limpieza y medios auxiliares. Según UNE-EN-998-1:2004, RC-08, NTE-FFL, CTE-SE-F y medida deduciendo huecos superiores a 1 m2.																	
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>20,92</td><td>9,00</td><td>-</td><td>188,28</td><td></td></tr></table>		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	20,92	9,00	-	188,28		188,28	34,54	6.503,19
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal												
	1,00	20,92	9,00	-	188,28													
1.6.2	m2. Fábrica de bloques de termoarcilla de 30x19x24 cm. de baja densidad, para ejecución de muros autoportantes o cerramiento, constituidos por mezcla de arcilla, esferas de poliestireno expandido y otros materiales granulares, para revestir, recibidos con mortero de cemento CEM II/B-M 32,5 N y arena de río M-10, i/p.p. de formación de dinteles (hormigón y armaduras, según normativa), jambas y ejecución de encuentros, roturas, replanteo, nivelación, aplomado, limpieza y medios auxiliares, s/NTE-FFB-6 y CTE-SE-F, medida deduciendo huecos superiores a 1 m2.																	
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td>separación centro transformación</td><td>1,00</td><td>6,16</td><td>2,90</td><td>-</td><td>17,86</td><td></td></tr></table>		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	separación centro transformación	1,00	6,16	2,90	-	17,86		17,86	33,00	589,38
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal												
separación centro transformación	1,00	6,16	2,90	-	17,86													
1.6.3	m. Fábrica de ladrillo cara vista de tejar fabricado manualmente de 24x11,5x3,8 cm. colocado a tizón de 1 pie de espesor y dos hiladas de altura, recibido con mortero bastardo de cemento blanco BL-II/A-L 42,5 R, cal y arena de río tipo M-5, i/ enjarjes, humedecido de las piezas, rejuntado, replanteo, nivelación y aplomado, mermas y roturas, limpieza y medios auxiliares. Según RC-08, NTE-FFL y CTE-SE-F. Medido en su longitud.																	
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>21,61</td><td>-</td><td>-</td><td>21,61</td><td></td></tr></table>		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	21,61	-	-	21,61		21,61	45,00	972,45
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal												
	1,00	21,61	-	-	21,61													
1.6.4	m2. Chapado de pizarra en pieza irregular de 3 a 4 cm. de espesor, recibido con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río M-5, rejuntado con lechada de cemento CEM II/B-P 32,5 N y limpieza, s/NTE-RPC-8, medido deduciendo huecos.																	
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr></table>		Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal										
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal												

COAR CONSTRUCCIONES, S.L

SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca

OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.

PROPIEDAD:Fundación Carral

FECHA: 05 / 10 / 16

PÁGINA: 5

A+

Applus®

RECONOCIMIENTO DE CALIDAD

ISO 9001

Certificación Internacional

certified.com

Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe																																			
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>perímetro</td><td>1,00</td><td>21,61</td><td>1,20</td><td>-</td><td>25,93</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>25,93</td><td>46,001.192,78</td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	perímetro	1,00	21,61	1,20	-	25,93							25,93	46,001.192,78																	
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																	
perímetro	1,00	21,61	1,20	-	25,93																																		
					25,93	46,001.192,78																																	
1.6.5	ud. Recibido de cerco de ventanas de hasta 2 m2 de superficie, con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-10, i/ apertura de huecos para garras y/o entregas, colocación, aplomado del marco, material auxiliar, limpieza y medios auxiliares. Según RC-08. Medida la superficie realmente ejecutada.																																						
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>p.baja</td><td>4,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>4,00</td><td></td></tr><tr><td>p. primera</td><td>3,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>3,00</td><td></td></tr><tr><td>p. segunda</td><td>8,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>8,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>15,00</td><td>20,00300,00</td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	p.baja	4,00	-	-	-	4,00		p. primera	3,00	-	-	-	3,00		p. segunda	8,00	-	-	-	8,00							15,00	20,00300,00			
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																	
p.baja	4,00	-	-	-	4,00																																		
p. primera	3,00	-	-	-	3,00																																		
p. segunda	8,00	-	-	-	8,00																																		
					15,00	20,00300,00																																	
1.6.6	ud. Recibido de cercos en muros, mayores de 3 m2. con mortero de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río tipo M-10, totalmente colocado y aplomado. Incluso material auxiliar, limpieza y medios auxiliares. Según RC-08. Medida la superficie realmente ejecutada.																																						
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>p.baja</td><td>2,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>2,00</td><td></td></tr><tr><td>p. primera</td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>3,00</td><td>25,0075,00</td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	p.baja	2,00	-	-	-	2,00		p. primera	1,00	-	-	-	1,00							3,00	25,0075,00										
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																	
p.baja	2,00	-	-	-	2,00																																		
p. primera	1,00	-	-	-	1,00																																		
					3,00	25,0075,00																																	
1.6.7	Ml. Vierteaguas de ladrillo de era colocado a tizon en una hilada, recibido con mortero de cemento y arena de rio, rematado y terminado.																																						
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>p.baja</td><td>4,00</td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>4,00</td><td></td></tr><tr><td>p.primera</td><td>3,00</td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>3,00</td><td></td></tr><tr><td>p.segunda</td><td>8,00</td><td>0,40</td><td>-</td><td>-</td><td>3,20</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>10,20</td><td>20,00204,00</td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	p.baja	4,00	1,00	-	-	4,00		p.primera	3,00	1,00	-	-	3,00		p.segunda	8,00	0,40	-	-	3,20							10,20	20,00204,00			
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																	
p.baja	4,00	1,00	-	-	4,00																																		
p.primera	3,00	1,00	-	-	3,00																																		
p.segunda	8,00	0,40	-	-	3,20																																		
					10,20	20,00204,00																																	
1.6.8	ud. Ayudas de albañilería a instalación de cuarto de instalaciones incluyendo mano de obra en carga y descarga, materiales, apertura y tapado de rozas, recibidos, remates y ayudas, i/p.p. material auxiliar, limpieza y medios auxiliares																																						
	<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td>650,00650,00</td></tr></table>	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	-	-	-	1,00							1,00	650,00650,00																	
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																	
	1,00	-	-	-	1,00																																		
					1,00	650,00650,00																																	
1.6	Total subcapítulo CERRAMIENTOS, DIVISIO					10.486,80																																	
1.7	REVESTIMIENTOS																																						

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16	
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 6	

Applus®

ISO 9001


certificación

tecnológica


CONSTRUCCIÓN


Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe																																																																																																																														
1.7.1	m2. Revestimiento de paramentos verticales con mortero lbertixo blanco (20N/mm2),compuesto de cemento y cal modificado, aditivos y áridos seleccionados, espesor máximo 20 mm. Aplicado mediante máquina de proyectar directamente sobre el soporte, i/p.p. de medios auxiliares, s/NTE-RPR-7, se descontarán huecos mayores de 3 m2 y se medirán mochetas.																																																																																																																																	
<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td>fachadas</td><td>1,00</td><td>20,92</td><td>8,60</td><td>-</td><td>179,91</td><td></td></tr><tr><td>techos</td><td>2,00</td><td>3,14</td><td>9,50</td><td>-</td><td>59,66</td><td></td></tr><tr><td colspan="7">***jambas</td></tr><tr><td colspan="7">ventanas-puertas</td></tr><tr><td>P. baja</td><td>4,00</td><td>0,60</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,29</td><td></td></tr><tr><td></td><td>8,00</td><td>1,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,97</td><td></td></tr><tr><td></td><td>4,00</td><td>0,50</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,24</td><td></td></tr><tr><td></td><td>4,00</td><td>2,32</td><td>0,12</td><td>-</td><td>1,11</td><td></td></tr><tr><td></td><td>2,00</td><td>2,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,48</td><td></td></tr><tr><td>P. 1ª</td><td>6,00</td><td>1,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,73</td><td></td></tr><tr><td></td><td>6,00</td><td>1,28</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,92</td><td></td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>2,20</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,26</td><td></td></tr><tr><td></td><td>2,00</td><td>2,23</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,54</td><td></td></tr><tr><td>P. 2ª</td><td>12,00</td><td>0,42</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,60</td><td></td></tr><tr><td></td><td>12,00</td><td>0,50</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,72</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>246,43</td><td>23,30 5.741,82</td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	fachadas	1,00	20,92	8,60	-	179,91		techos	2,00	3,14	9,50	-	59,66		***jambas							ventanas-puertas							P. baja	4,00	0,60	0,12	-	0,29			8,00	1,01	0,12	-	0,97			4,00	0,50	0,12	-	0,24			4,00	2,32	0,12	-	1,11			2,00	2,01	0,12	-	0,48		P. 1ª	6,00	1,01	0,12	-	0,73			6,00	1,28	0,12	-	0,92			1,00	2,20	0,12	-	0,26			2,00	2,23	0,12	-	0,54		P. 2ª	12,00	0,42	0,12	-	0,60			12,00	0,50	0,12	-	0,72							246,43	23,30 5.741,82							
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																																																																																																												
fachadas	1,00	20,92	8,60	-	179,91																																																																																																																													
techos	2,00	3,14	9,50	-	59,66																																																																																																																													
***jambas																																																																																																																																		
ventanas-puertas																																																																																																																																		
P. baja	4,00	0,60	0,12	-	0,29																																																																																																																													
	8,00	1,01	0,12	-	0,97																																																																																																																													
	4,00	0,50	0,12	-	0,24																																																																																																																													
	4,00	2,32	0,12	-	1,11																																																																																																																													
	2,00	2,01	0,12	-	0,48																																																																																																																													
P. 1ª	6,00	1,01	0,12	-	0,73																																																																																																																													
	6,00	1,28	0,12	-	0,92																																																																																																																													
	1,00	2,20	0,12	-	0,26																																																																																																																													
	2,00	2,23	0,12	-	0,54																																																																																																																													
P. 2ª	12,00	0,42	0,12	-	0,60																																																																																																																													
	12,00	0,50	0,12	-	0,72																																																																																																																													
					246,43	23,30 5.741,82																																																																																																																												
1.7.2	m2. Enfoscado fratasado sin maestrear con mortero CSIII-W1 de cemento CEM II/B-P 32,5 N y arena de río M-5, en paramentos verticales de 20 mm. de espesor, i/regleado, sacado de rincones, aristas y andamiaje, s/NTE-RPE-5 y UNE-EN 998-1, medido deduciendo huecos.																																																																																																																																	
<table><tr><th>Comentario</th><th>Unidad</th><th>Longitud</th><th>Anchura</th><th>Altura</th><th>Parcial</th><th>Subtotal</th></tr><tr><td colspan="7">***interior molino</td></tr><tr><td>p. baja</td><td>1,00</td><td>19,35</td><td>2,90</td><td>-</td><td>56,12</td><td></td></tr><tr><td>p. 1º</td><td>1,00</td><td>19,35</td><td>3,00</td><td>-</td><td>58,05</td><td></td></tr><tr><td>p. 2ª</td><td>1,00</td><td>19,35</td><td>2,15</td><td>-</td><td>41,60</td><td></td></tr><tr><td colspan="7">***jambas</td></tr><tr><td colspan="7">ventanas-puertas</td></tr><tr><td>P. baja</td><td>4,00</td><td>0,60</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,29</td><td></td></tr><tr><td></td><td>8,00</td><td>1,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,97</td><td></td></tr><tr><td></td><td>4,00</td><td>0,50</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,24</td><td></td></tr><tr><td></td><td>4,00</td><td>2,32</td><td>0,12</td><td>-</td><td>1,11</td><td></td></tr><tr><td></td><td>2,00</td><td>2,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,48</td><td></td></tr><tr><td>P. 1ª</td><td>6,00</td><td>1,01</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,73</td><td></td></tr><tr><td></td><td>6,00</td><td>1,28</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,92</td><td></td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>2,20</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,26</td><td></td></tr><tr><td></td><td>2,00</td><td>2,23</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,54</td><td></td></tr><tr><td>P. 2ª</td><td>12,00</td><td>0,42</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,60</td><td></td></tr><tr><td></td><td>12,00</td><td>0,50</td><td>0,12</td><td>-</td><td>0,72</td><td></td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	***interior molino							p. baja	1,00	19,35	2,90	-	56,12		p. 1º	1,00	19,35	3,00	-	58,05		p. 2ª	1,00	19,35	2,15	-	41,60		***jambas							ventanas-puertas							P. baja	4,00	0,60	0,12	-	0,29			8,00	1,01	0,12	-	0,97			4,00	0,50	0,12	-	0,24			4,00	2,32	0,12	-	1,11			2,00	2,01	0,12	-	0,48		P. 1ª	6,00	1,01	0,12	-	0,73			6,00	1,28	0,12	-	0,92			1,00	2,20	0,12	-	0,26			2,00	2,23	0,12	-	0,54		P. 2ª	12,00	0,42	0,12	-	0,60			12,00	0,50	0,12	-	0,72	
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																																																																																																																												
***interior molino																																																																																																																																		
p. baja	1,00	19,35	2,90	-	56,12																																																																																																																													
p. 1º	1,00	19,35	3,00	-	58,05																																																																																																																													
p. 2ª	1,00	19,35	2,15	-	41,60																																																																																																																													
***jambas																																																																																																																																		
ventanas-puertas																																																																																																																																		
P. baja	4,00	0,60	0,12	-	0,29																																																																																																																													
	8,00	1,01	0,12	-	0,97																																																																																																																													
	4,00	0,50	0,12	-	0,24																																																																																																																													
	4,00	2,32	0,12	-	1,11																																																																																																																													
	2,00	2,01	0,12	-	0,48																																																																																																																													
P. 1ª	6,00	1,01	0,12	-	0,73																																																																																																																													
	6,00	1,28	0,12	-	0,92																																																																																																																													
	1,00	2,20	0,12	-	0,26																																																																																																																													
	2,00	2,23	0,12	-	0,54																																																																																																																													
P. 2ª	12,00	0,42	0,12	-	0,60																																																																																																																													
	12,00	0,50	0,12	-	0,72																																																																																																																													

COAR CONSTRUCCIONES, S.L			OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16		
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca			PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 7		
Clave	Descripción				Medición	Precio	Importe	
	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	
						162,63	18,00	2.927,34
1.7	Total subcapítulo REVESTIMIENTOS							8.669,16
1.8	PAVIMENTOS							
1.8.1	m2. Solado de baldosa de gres porcelánico prensado, no esmaltado, de 31x31 cm. (Al,Alla s/UNE-EN-67), recibido con adhesivo C2 s/EN-12004 Cleintex Flexible blanco, i/rejuntado con mortero tapajuntas CG2 s/EN-13888 Texjunt color y limpieza, s/NTE-RSR-2, medido en superficie realmente ejecutada.							
	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	
	suelo p.baja	1,00	3,14	9,50	-	29,83		
	a deducir muro							
	separación	-1,00	6,16	0,24	-	-1,48		
	suelo p.1ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83		
	suelo p.2ª	1,00	3,14	9,50	-	29,83		
						88,01	42,00	3.696,42
1.8	Total subcapítulo PAVIMENTOS							3.696,42
1.9	CARPINTERÍA DE ALUMINIO							
1.9.1	Ud. Ventana practicable de dos hojas de aluminio con R.P.T de la sereie AF 52, con doble acristalamiento vidrio 4/cámara 10/guardina sun 4, en ral spc. MEDIDA: 1010X1267 MM.							
	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	
	P. 1ª	3,00	-	-	-	3,00		
						3,00	283,19	849,57
1.9.2	Ud. Ventana batiente de una hoja de aluminio con R.P.T de la sereie AF 52, con doble acristalamiento vidrio 4/cámara 10/guardian sun 4, en ral spc, con solape monoblock 35 mm. MEDIDA: 401X406 MM.							
	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	
	p. 2ª	8,00	-	-	-	8,00		
						8,00	69,74	557,92
1.9.3	Ud. Puerta de dos hojas en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc, con solape monoblock de 35 mm y doble acristalamiento compuesto por vidrio 4/cámara 10/guardian sun 4. MEDIDA: 1951X2153 MM.							
	Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal	
		1,00	-	-	-	1,00		

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.				FECHA: 05 / 10 / 16			
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral				PÁGINA: 8			

Clave	Descripción					Medición	Precio	Importe	
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
						1,00	687,52	687,52	
1.9.4	Ud. Puerta de dos hojas en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc, con solope monoblock de 35 mm. MEDIDA: 1879X2319 MM.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
puerta CT- p. baja		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	1.328,32	1.328,32	
1.9.5	Ud. Puerta de dos hojas en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc, con solope monoblock de 35 mm. MEDIDA: 1997X2307 MM.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
puerta GE - p. baja		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	1.404,43	1.404,43	
1.9.6	Ud. Fijo en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc con lamas horizontales y solope monoblock de 35 mm. MEDIDA: 1002X589 MM.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
p. baja		2,00	-	-	-	2,00			
						2,00	198,95	397,90	
1.9.7	Ud. Fijo en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc con lamas horizontales y solope monoblock de 35 mm. MEDIDA: 1012X494 MM.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
p.baja		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	176,65	176,65	
1.9.8	Ud. Fijo en aluminio con RPT de la serie AF 52 en ral spc con lamas horizontales y solope monoblock de 35 mm. MEDIDA: 1027X494 MM.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
p. baja		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	179,28	179,28	
1.9	Total subcapítulo CARPINTERÍA DE ALUMIN								5.581,59
1.10	CERRAJERÍA								
1.10.1	m. Barandilla tramo curvo inclinada de 1 m de alto, pletina de 50x10 mm, verticales de cuadradillo de 16 mm, pasamanos de pletina de 50x10 mm, montado y lacado óxido marrón.								

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.		FECHA: 05 / 10 / 16			
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral		PÁGINA: 9			
Clave	Descripción			Medición	Precio	Importe	
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
escalera molino		1,00	3,70	-	-	3,70	
						3,70	168,00
							621,60
1.10.2 ml. Barandilla tramo curvo de 1 m de alto, pletina de 50x10 mm, verticales de cuadradillo de 16 mm, pasamanos de pletina de 50x10 mm, montado y lacado óxido marrón.							
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
hueco escalera curva		1,00	2,45	-	-	2,45	
						2,45	158,40
							388,08
1.10.3 m. Barandilla metálica de 1 m de alto, de pletina de 50x10 mm, barros verticales de cuadradillo de 16 mm, pasamos de pletina de 50x10 mm, montado y lacado oxido marrón.							
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
perimetro escalera escamoteable		1,00	5,32	-	-	5,32	
						5,32	132,00
							702,24
1.10.4 ud. Suministro y colocación de estructura metálica para sujeción de bastidor y bastidor para motor de molino.							
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
		1,00	-	-	-	1,00	
						1,00	1.308,52
							1.308,52
1.10.5 Ud. Perfiles, chapas y tramex para centro de transformación, todo ello galvanizado y completamente montado.							
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
		1,00	-	-	-	1,00	
						1,00	1.138,68
							1.138,68
1.10.6 Ud. Cerramiento para centro de transformación de ángulo y malla electrosoldada de 2,75x2,13 m, montado y galvanizado.							
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal
		1,00	-	-	-	1,00	
						1,00	684,00
							684,00
1.10.7 m. Barandilla tramo curvo de 1 m de alto, pletina de 50x10 mm, verticales de cuadradillo de 16 mm, pasamanos de pletina de 50x10 mm, montado y lacado oxido marrón.							

COAR CONSTRUCCIONES, S.L			OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16			
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca			PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 10			
Clave	Descripción					Medición	Precio	Importe	
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
		1,00	2,00	-	-	2,00			
						2,00	158,40	316,80	
1.10	Total subcapítulo CERRAJERÍA								5.159,92
1.11	PINTURAS								
1.11.1	m2. Pintura plástica mate dos manos aplicada sobre paramentos verticales previamente enfoscados.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
interior de molino		1,00	157,00	-	-	157,00			
						157,00	4,80	753,60	
1.11.2	Ud. Teñido, lijado y barnizado de techo abovedado de madera con previa imprimación de fondo.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	630,00	630,00	
1.11.3	Ud. Esmalte en laca satinado dos manos, color imitación madera sobre estructura de hierro para la cubierta del molino, incluso previo lijado.								
Comentario		Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		
		1,00	-	-	-	1,00			
						1,00	936,00	936,00	
1.11	Total subcapítulo PINTURAS								2.319,60
Total capítulo									64.164,42

COAR CONSTRUCCIONES, S.L		OBRA: MOLINO EÓLICO, CENTRO DE TRANSF. Y GRUPO ELECT.			FECHA: 05 / 10 / 16	
SITUACIÓN:Finca la Inesa, Nambroca		PROPIEDAD:Fundación Carral			PÁGINA: 11	

Applus®

RECONOCIMIENTO CERTIFICADO

ISO 9001

de 2015

Certificación Tecnológica Central

ACCREDITACIÓN EN

Clave	Descripción	Medición	Precio	Importe																					
2	INSTALACION EOLICA																								
2.1	ESTRUCTURA HÉLICES																								
2.1.1	Ud. Suministro y colocación de hélices para molino con ejes de tubo estructural de 80x80x3 mm y bastidor de aluminio, galvanizado y lacado.																								
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td>6.602,40</td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	-	-	-	1,00							1,00	6.602,40
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																			
	1,00	-	-	-	1,00																				
					1,00	6.602,40																			
						6.602,40																			
2.1	Total subcapítulo ESTRUCTURA HÉLICES					6.602,40																			
2.2	MAQUINARIA AEROGENERADOR																								
2.2.1	Ud. Proyecto especial de elementos mecánico-eléctricos para adaptación de molino manchego en aerogenerador para conexión a red de autoconsumo consistente en:**Alternador de imanes permanenetes de 10Kw con salida en trifásico alterna de frecuencia y tensión variable, con sistema de freno automático con resistencias, incluyendo puente rectificador para alimentar inversores de conexión a la red eléctrica.**Sistema de detección de falta de red para activar el freno.**Estructura seguidor para giro de la cúpula.**Sistema de seguimiento eólico, con veleta y anemómetro para orientar las palas al viento y retirarlas en caso de viento excesivo.**Ingeniería técnica de diseño y desarrollo.																								
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td>36.414,00</td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	-	-	-	1,00							1,00	36.414,00
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																			
	1,00	-	-	-	1,00																				
					1,00	36.414,00																			
						36.414,00																			
2.2.2	Ud. Documentación técnica y manual de operación.																								
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td>540,00</td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	-	-	-	1,00							1,00	540,00
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																			
	1,00	-	-	-	1,00																				
					1,00	540,00																			
						540,00																			
2.2	Total subcapítulo MAQUINARIA AEROGENE					36.954,00																			
2.3	AYUDAS																								
2.3.1	Ud. Portes de maquinaria eólica y auxiliara para el funcionamiento de la instalación.																								
<table><tr><td>Comentario</td><td>Unidad</td><td>Longitud</td><td>Anchura</td><td>Altura</td><td>Parcial</td><td>Subtotal</td></tr><tr><td></td><td>1,00</td><td>-</td><td>-</td><td>-</td><td>1,00</td><td></td></tr><tr><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td>1,00</td><td>84,00</td></tr></table>					Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal		1,00	-	-	-	1,00							1,00	84,00
Comentario	Unidad	Longitud	Anchura	Altura	Parcial	Subtotal																			
	1,00	-	-	-	1,00																				
					1,00	84,00																			
						84,00																			

Resumen de capítulos

Clave / código	Título	Importe
1	OBRA CIVIL	64.164,42
2	INSTALACION EOLICA	43.700,40
	PRESUPUESTO DE OBRA IVA NO INCLUIDO	107.864,82
	21% IVA	22.651,61
	TOTAL PRESUPUESTO IVA INCLUIDO	130.516,43

El importe del PRESUPUESTO de la obra IVA INCLUIDO asciende a la cantidad de CIENTO TREINTA MIL QUINIENTOS DIECISÉIS EUROS con CUARENTA Y TRES céntimos

COAR CONSTRUCCIONES SL

